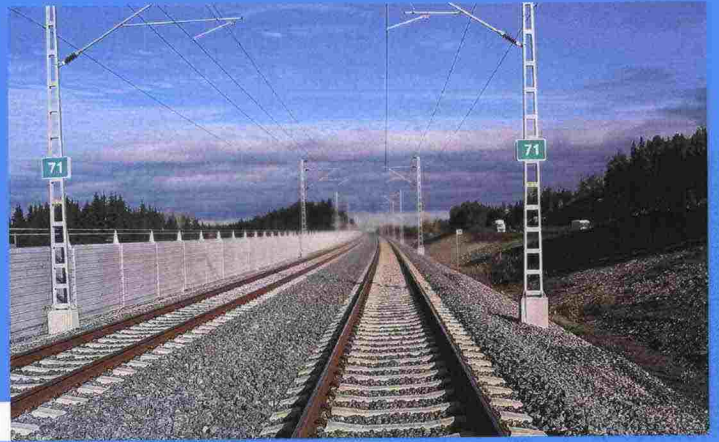


## Maatutkatekniikan hyödyntäminen radan tukikerroksen kunnan arvioinnissa



Tuomo Passi



RATAHALLINTOKESKUS  
BANFÖRVALTNINGSCENTRALEN

Ratahallintokeskuksen  
julkaisuja A 8/2007

Maatutkatekniikan hyödyntäminen radan  
tukikerroksen kunnon arvioinnissa

Tuomo Passi

Helsinki 2007



**Ratahallintokeskus**

Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 8/2007

ISBN 978-952-445-197-0 (nid.)

ISBN 978-952-445-198-7 (pdf)

ISSN 1455-2604

Julkaisu pdf-muodossa: [www.rhk.fi](http://www.rhk.fi)

Kannen ulkoasu: Proinno Design Oy, Sodankylä

Kansikuva: Tuomo Passi

Helsinki 2007

**Passi, Tuomo: Maatutkatekniikan hyödyntäminen radan tukikerroksen kunnan arvioinnissa.** Ratahallintokeskus, Rataverkko-osasto. Helsinki 2007. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 8/2007. 84 sivua ja 4 liitettä. ISBN 978-952-445-197-0, ISBN 978-952-445-198-7 (pdf), ISSN 1455-2604.

**Avainsanat:** maatutka, moniantennitekniikka, taajuusspektri, raidesepeli, hienoaines

## TIIVISTELMÄ

Maatutkaus on geofysikaalinen tutkimusmenetelmä, joka havaitsee tutkittavan materiaalin sähköisten ominaisuuksien muutokset rakennetta rikkomatta. Tämä työ käsittää kirjallisuuteen sekä kenttä- ja laboratoriokokeisiin perustuvan tutkimuksen maatutkatekniikan hyödyntämisestä raidesepelin laadun arvioimisessa. Työn tavoitteena oli tunnistaa rakeisuudeltaan erilaisia raidesepeleitä ja luoda edellytykset maatutkan perusteella tehtävälle tukikerroksen laatuluokitukselle. Maatutkatekniikan avulla tehtävä raidesepelin laadun selvittäminen on huomattavasti nopeampaa kuin pistemäiseen näytteenottoon perustuva laadunseuranta.

Kenttä- ja laboratoriokokeissa käytettiin hyväksi uutta moniantennitekniikkaan perustuvaa 3D-maatutkaa, jolla voidaan mitata jopa 31 vierekkäistä pituuslinjaa, kun tavanomaisilla 2D-maatutkilla voidaan mitata tavallisesti kahta pituuslinjaa kerrallaan. Maatutkamittausten referenssitiedoksi rataosilta haettiin raidesepelinäytteitä, joita tutkittiin laboratoriossa.

3D-maatutka lähettää tutkittavaan materiaaliin sähkömagneettisen signaalin taajuudella 100–2000 MHz. Raidesepelin laadun arviointi perustuu signaalin korkeiden taajuuksien vaimenemiseen. Vaimeneminen on suurempaa, mitä enemmän raidesepeli on hienontunut.

Maatutkan lähettämän signaalin korkeiden taajuuksien vaimenemisella ja näytteistä määritetyllä raekooltaan alle 0,063 mm partikkeleita edustavalla hienoainespitoisuudella voitiin todeta selvä yhteys. Myös raidesepelissä olevan raekooltaan alle 1,0 mm lajitteen pitoisuuden huomattiin korreloivan selvästi taajuuspinta-alan vaihteluihin. Tämän lajitteen käyttö referenssitietona olisi perusteltua mm. yksinkertaisemman seulonta-tapahtuman kannalta. Hienoaineksen vedensitomiskyvyn havaittiin myös vaikuttavan parantavasti korrelaatioihin.

Alhaisten hienoainespitoisuuksien tunnistaminen signaalin taajuussisällön perusteella on epävarmempaa verrattuna voimakkaasti hienontuneeseen raidesepeliin. Osittain tämän seurauksena raiteen keskilinjalla olevan raidesepelin laadun arvioiminen on hankalampaa kuin ratapölkkyjen päiden tasalla olevan, yleensä enemmän hienontuneen raidesepelin.

Pölkkyjen päissä olevalle raidesepelille kehitettiin kolmiportainen laatuluokitus, joka perustuu maatutkasignaalin taajuussisällöstä laskettuun hienontuneisuusindeksiin. Luokitusta voidaan hyödyntää tukikerroksen puhdistustoimenpiteiden suunnittelussa, mutta menetelmä vaatii jatkotarkasteluina eri rataosilla tehtäviä mittauksia. Lisäksi signaalin jatkokäsittelyllä on mahdollista saavuttaa edelleen luotettavampia tuloksia.

**Passi, Tuomo: Utnyttjande av markradarteknik för bestämning av järnvägsballastens skick.** Banförvaltningscentralen, Bannätsavdelningen. Helsingfors 2007. Banförvaltningscentralens publikationer A 8/2007. 84 sidor och 4 bilagor. ISBN 978-952-445-197-0, ISBN 978-952-445-198-7 (pdf), ISSN 1455-2604.

**Nyckelord:** markradar, 3D-teknik, frekvensspektrum, ballastmakadam, finjord

## SAMMANDRAG

Markradarsondering är en geofysikalisk undersökningsmetod som observerar förändringar i materialets elektriska egenskaper, utan att söndra konstruktionen. Detta arbete omfattar en undersökning där markradarteknik utnyttjas för att bedöma makadamets kvalitet i järnvägsballasten. Undersökningen baserar sig på litteratur samt på fält- och laboratorieförsök. Målet med arbetet är att identifiera kornigheten i olika makadam och att skapa förutsättningar att med markradar klassificera ballastens kvalitet. Undersökningen av ballastens kvalitet med markradarteknik är betydligt snabbare metod än att följa upp kvaliteten i provtagningspunkter.

En ny markradar som baserar sig på 3D-teknik användes vid fält- och laboratorieförsöken. Markradarn kan mäta upp till 31 parallella linjer, då den vanliga markradarn med 2D-teknik vanligen endast kan mäta två linjer i taget. Ballastprover togs på banavsnitten och undersöktes i laboratorium för att användas som referensdata vid markradarmätningarna.

Markradarns 3D-teknik sänder inom frekvensen 100–2000 MHz elektromagnetiska signaler i materialet som undersöks. Bedömningen av makadamets kvalitet baserar sig på dämpningen av signalens höga frekvenser. Ju mer makadammet har sönderdelats desto större är dämpningen.

Ett klart samband kunde konstateras mellan dämpningen av markradarsignalens höga frekvenser och den finjordshalt som det analyserade provet på mindre än 0,063 mm partiklar representerar. Även halten kornfraktioner på mindre än 1,0 mm i ballasten konstaterades tydligt korrelera med frekvensytans variationer. Användningen av denna kornfraktion som referens skulle vara motiverad bl.a. med tanke på en enklare korngradering. Finjordens förmåga att ta upp vatten konstaterades också inverka positivt på korrelationerna.

Det är inte lika tillförlitligt att med signalens frekvensinnehåll identifiera små halter finjord jämfört med att mäta mycket sönderdelat ballastmakadam. Det är därför delvis svårare att bestämma makadamets kvalitet vid spårets mittlinje än att bestämma kvaliteten i sliprarnas ändor, där makadammet vanligen är mera sönderdelat.

En kvalitetsklassificering i tre steg utvecklades för makadammet i sliprarnas ändor. Klassificeringen bygger på ett index för sönderdelningen som beräknats enligt radarsignalens frekvensinnehåll. Klassificeringen kan utnyttjas när rengöringsåtgärder planeras för ballasten, men metoden kräver fortsatta granskningar såsom mätningar på olika banavsnitt. Dessutom kan allt tillförlitligare resultat uppnås genom att ytterligare behandla signalen.

**Passi, Tuomo: Using Ground Penetrating Radar to Evaluate the Quality of Railway Ballast.** Finnish Rail Administration, Rail Network Department. Publications of the Finnish Rail Administration A 8/2007. 84 pages and 4 appendices. ISBN 978-952-445-197-0, ISBN 978-952-445-198-7 (pdf), ISSN 1455-2604.

**Keywords:** ground penetrating radar, 3D-technique, frequency spectrum, railway ballast, fines

## ABSTRACT

Ground penetrating radar (GPR) is a nondestructive geophysical survey method in which changes in the electrical properties of a material are observed. This research into using the GPR technique to evaluate the quality of railway ballast is based on a literature review, GPR measurements and laboratory investigations of ballast samples. The main goals of the study were to identify the railway ballast of different granularity and to establish some premises for the GPR-based classification of the quality of railway ballast. It's much faster to use the GPR to evaluate the quality of railway ballast than it is by sampling.

Field and laboratory investigations were done using a new 3-dimensional GPR, which can measure as many as 31 longitudinal lines simultaneously while a typical 2-dimensional ground penetrating radar system can usually only measure two longitudinal lines at once. Railway ballast samples were obtained from railway lines as a reference material for the GPR measurements. Samples were analyzed in the laboratory.

A 3D-GPR sends an electromagnetic signal into material at a frequency range of 100–2000 MHz. The estimation of the quality of the railway ballast is based on attenuation of the high frequencies of the signal. The greater the attenuation is the greater the railway ballast has fouled.

The identification of small amounts of fouling based on frequency contents of the signal is more uncertain than identifying large amounts of fouling in railway ballast. This is partly because the estimation of the quality of the railway ballast in the middle line of railway is more difficult than identifying generally more fouled ballast at the end of the sleepers.

A three-step quality classification was developed for railway ballast located under the ends of the sleepers. Classification is based on a fouling index which is calculated according to the frequency contents of the GPR signal. This three-step quality classification can be utilized in planning of the cleaning procedures of the ballast bed, but the method requires more examination by making GPR measurements on railways. In addition it is possible to achieve more reliable results through further processing of the GPR signal.

## ALKUSANAT

Tämän työn on diplomityönä tehnyt diplomi-insinööri Tuomo Passi Tampereen teknillisen yliopiston Maa- ja pohjarakenteiden laitoksella.

Ratahallintokeskuksen tilaaman työn tavoitteena oli hyödyntää maatutkatekniikkaa raidesepelin laadun arvioinnissa. Työn ohjaajana Ratahallintokeskuksessa toimi teknisen yksikön päällikkö Matti Levomäki. Työn tarkastajina toimivat professori Pauli Kolisoja ja tekniikan tohtori Antti Nurmikolu Tampereen teknilliseltä yliopistolta sekä filosofian maisteri Mika Silvast Roadscanners Oy:stä.

Helsingissä, syyskuussa 2007

Ratahallintokeskus  
Rataverkko-osasto



## SISÄLLYSLUETTELO

|  |    |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ.....   | 3  |
| SAMMANDRAG.....  | 4  |
| ABSTRACT .....   | 5  |
| ALKUSANAT .....  | 6  |
| MERKINNÄT JA LYHENTEET .....                                     | 9  |
| 1 JOHDANTO .....   | 10 |
| 2 RADAN RAKENNE .....  | 11 |
| 2.1 Radan rakenneosat .....                                      | 11 |
| 2.2 Radan tukikerros .....                                       | 12 |
| 2.2.1 Yleistä.....   | 12 |
| 2.2.2 Tukikerroksen mitat.....                                   | 12 |
| 2.2.3 Tukikerroksen tehtävät .....                               | 13 |
| 2.2.4 Tukikerrosmateriaalilta vaaditut ominaisuudet .....        | 13 |
| 2.3 Hienoaaines tukikerroksessa.....                             | 15 |
| 2.3.1 Hienoaineksen vaikutukset tukikerrokselle .....            | 15 |
| 2.3.2 Hienoaineksen lähteet.....                                 | 17 |
| 2.3.3 Tukikerroksen hienontuneisuuden arviointi .....            | 18 |
| 3 MAATUTKALUOTAUKSEN TEORIA .....                                | 20 |
| 3.1 Maatutkaluotauksen historia rautateillä .....                | 20 |
| 3.2 Maatutkatekniikka.....                                       | 20 |
| 3.2.1 Maatutkaluotauksen periaate .....                          | 20 |
| 3.2.2 3D-tekniikka .....   | 21 |
| 3.2.3 Väliaineen sähköiset ja magneettiset ominaisuudet .....    | 24 |
| 3.2.4 Maatutkasignaalin nopeus ja aallonpituus väliaineessa..... | 25 |
| 3.3 Maatutkasignaalin eteneminen raidesepeissä .....             | 26 |
| 3.3.1 Signaalin eteneminen ja vaimeneminen .....                 | 26 |
| 3.3.2 Hienoaineksen vaikutus signaalin etenemiseen.....          | 27 |
| 4 MAATUTKAN HYÖDYNTÄMINEN RATARAKENTEEN<br>TUTKIMISESSA .....    | 33 |
| 4.1 Mittausaineiston käsittely .....                             | 33 |
| 4.1.1 Maatutkalaitteistot ja -ohjelmistot.....                   | 33 |
| 4.1.2 Mittausaineiston esikäsittely .....                        | 34 |
| 4.1.3 Mittausaineiston tulkinta .....                            | 34 |
| 4.1.4 Maatutkasignaalin taajuussisällön analysointi .....        | 35 |
| 4.2 Käyttökohteet .....  | 36 |
| 4.2.1 Rakenteen kerrosrajat ja -paksuudet.....                   | 36 |
| 4.2.2 Radan ongelmakohteiden syiden tarkastelu .....             | 37 |
| 4.2.3 Erityiskohteiden mittaukset .....                          | 38 |
| 4.2.4 Pohjamaan routivuuden arviointi .....                      | 39 |
| 4.2.5 Tukikerroksen laadun tutkimus .....                        | 39 |



|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5     | MAATUTKAMITTAUKSET JA REFERENSSITUTKIMUKSET .....                                  | 42 |
| 5.1   | Lähtökohdat tutkimuksille .....  | 42 |
| 5.2   | Maatutkalaitteisto ja aineiston käsittelyohjelmisto .....                          | 42 |
| 5.3   | Maatutkamittaukset TTY:n laboratoriossa.....                                       | 44 |
| 5.3.1 | Keinotekkoisten tutkimustapausten rakentaminen .....                               | 44 |
| 5.3.2 | Maatutkamittaukset .....   | 46 |
| 5.3.3 | Sepelin näytteenotto ja rakeisuuden määrittäminen .....                            | 46 |
| 5.4   | Tutkimukset Kerava–Lahti-oikoradalla .....   | 48 |
| 5.4.1 | Maatutkamittaukset .....   | 48 |
| 5.4.2 | Sepelin näytteenotto ja rakeisuuden määrittäminen .....                            | 48 |
| 5.5   | Tutkimukset rataosalla Tampere–Jyväskylä .....                                     | 50 |
| 5.5.1 | Maatutkamittaukset .....   | 50 |
| 5.5.2 | Sepelin näytteenotto ja rakeisuuden määrittäminen .....                            | 50 |
| 5.6   | Näytteiden tarkentavat laboratoriotutkimukset .....                                | 52 |
| 5.6.1 | Karkeiden partikkelien vedenimu.....   | 52 |
| 5.6.2 | Tukikerroksnäytteiden hienoaineksen laatu .....                                    | 52 |
| 6     | TULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI .....   | 53 |
| 6.1   | TTY:n laboratoriossa tehtyjen testien tulokset .....                               | 53 |
| 6.1.1 | Referenssitutkimusten tulokset.....  | 53 |
| 6.1.2 | Maatutkamittausten havainnot.....  | 53 |
| 6.2   | Ratamittausten tulokset .....  | 58 |
| 6.2.1 | Referenssitutkimusten tulokset.....  | 58 |
| 6.2.2 | Maatutkamittausten havainnot.....  | 61 |
| 6.2.3 | Maatutkasignaalin taajuussisällön ja näytetietojen vertailu .....                  | 65 |
| 6.2.4 | Hienoaineksen laadun vaikutus maatutkasignaalin taajuussisältöön.....              | 72 |
| 7     | PÄÄTELMÄT JA JATKOTUTKIMUKSET .....  | 75 |
| 7.1   | Raidesepelin hienontuneisuuden arviointi .....                                     | 75 |
| 7.2   | Raidesepelin laadun luokittelu maatutkasignaalin taajuussisällön perusteella ..... | 75 |
| 7.3   | Jatkotutkimusehdotukset .....  | 79 |

## LIITTEET

|         |  |
|---------|--|
| Liite 1 | Keinotekkoisen tutkimustapausten (TTY:n laboratorio) näytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät            |
| Liite 2 | Rataosan Kerava–Lahti raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät                                |
| Liite 3 | Rataosan Tampere–Jyväskylä raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät                           |
| Liite 4 | Hienoaineksista määritetyt lajitteiden <20 µm ja <2 µm osuudet hienoaineksessa (<63 µm) (Sedigraph-analyysi) |

## MERKINNÄT JA LYHENTEET

### Merkinnät

|              |  |
|--------------|--|
| $f$          | taajuus [Hz tai 1/s]                         |
| $\lambda$    | aallonpituus [m]                             |
| $\epsilon_r$ | väliaineen suhteellinen dielektrisyys        |
| $\mu_r$      | suhteellinen magneettinen permeabiliteetti   |
| $\sigma$     | sähkönjohtavuus [S/m]                        |
| $\rho$       | ominaisvastus [ $\Omega\text{m}$ ]           |
| $c$          | valon nopeus [m/s]                           |
| $\alpha$     | sähkömagneettisen aallon vaimeneminen [dB/m] |

### Lyhenteet

|      |  |
|------|--|
| FFT  | Fast Fourier Transform   |
| GPR  | Ground penetrating radar   |
| GPS  | Global Positioning System  |
| GSSI | Geophysical Survey System Incorporated                               |
| KV   | Radan korkeusviiva   |
| MBRT | Miljoonaa bruttotonnia kumulatiivisesta liikennemäärästä puhuttaessa |
| RHK  | Ratahallintokeskus   |
| RSMV | Rolling Stiffness Measurement Vehicle                                |
| SGY  | Suomen Geoteknillinen yhdistys                                       |
| SNA  | Surface Network Analyzer   |
| TTY  | Tampereen teknillinen yliopisto                                      |

## 1 JOHDANTO

Ensimmäiset maatutkamittaukset liikenneväylätutkimuksissa toteutettiin 1970-luvun alkupuolella Amerikassa, missä testattiin maatutkan käytettävyyttä tunneli- ja silta-tutkimuksissa. Skandinaviassa ensimmäiset maatutkamittaukset tehtiin 70-luvun lopulla ja 80-luvun alkupuolella Ruotsissa ja Tanskassa, mutta menetelmä ei vakiintunut yleiseen käyttöön. Suomessa ensimmäiset testimittaukset tehtiin v. 1986, jonka jälkeen maatutkaa alettiin käyttää laajasti tierakenteiden tutkimuksissa (Saarenketo, 2006). Rautatiellä maatutkan käyttö yleistyi ensimmäisten onnistuneiden, lähinnä kerrosrajoja selvittelevien, tutkimusten (Hugenschmidt, 1998, 2000; Gallagher, et al, 1998) jälkeen. Ensimmäiset tukikerroksen laatua koskevat tutkimukset (Clark, et al, 2001) julkaistiin vuosituhannen vaihteessa. Viime vuosina tutkimukset mahdollisuuksista hyödyntää maatutkatekniikkaa raidesepelitutkimuksissa ovat yleistyneet.

Viime vuosina myös Suomessa on alettu tehdä tutkimuksia tukikerroksen laadun selvittävyydestä maatutkalla (Silvast & Nurmikolu, 2005). Tutkimuksessa tarkasteltiin maatutkasignaalin taajuussisällön analysointiin perustuen mahdollisuuksia tunnistaa raekokojakaumaltaan erilaisia tukikerroksia. Tutkimuksen perusteella tukikerroksen laadun selvittäminen maatutkatekniikalla on mahdollista. Menetelmä vaatii kuitenkin lisätutkimuksia luotettavuuden parantamiseksi. Tämän työn tavoitteena on tutkia maatutkasignaalin korkeiden taajuuksien vaimenemista erilaatuisissa raidesepeleissä ja siten löytää mahdollisimman selkeä yhteys maatutkasignaalin taajuussisällön ja raidesepelin hienontuneisuuden välille. Vertailujen lähtökohtana pidetään raidesepelinäytteistä määritettyjä, raekooltaan alle 0,063 mm olevia hienoaainesmääriä, koska niillä oletetaan olevan suurin vaikutus signaalin korkeiden taajuuksien vaimentumiselle.

Rakennetta rikkomattoman maatutkatekniikan hyödyntäminen raidesepelin laadun selvittämisessä olisi teknis-taloudellisesti mielekästä verrattuna näytteenottoon perustuvaan menetelmään. Maatutkalla tiedonkeruu on nopeaa ja tuloksena saadaan jatkuvaa tietoa rakenteesta. Lisäksi uutta moniantennitekniikkaa hyödyntämällä voidaan mitata useita pituuslinjoja samanaikaisesti.

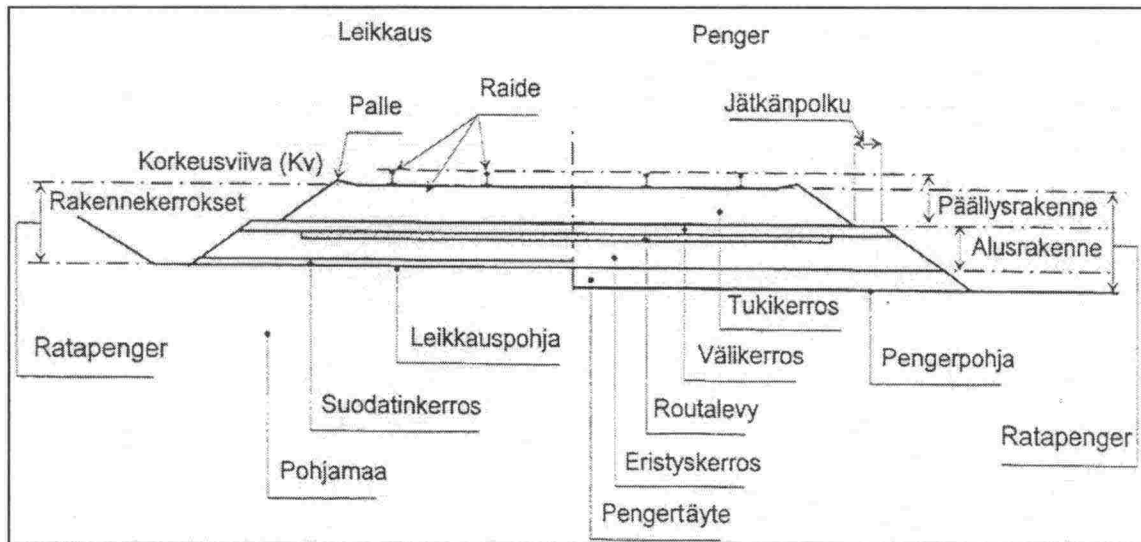
Työn teoriaosuus esitellään luvuissa 2–4. Luvussa 2 esitetään tukikerroksen tehtävät ja tukikerroksessa käytetyn raidesepelin CE-merkintävaatimukset Suomessa. Lisäksi luvussa kuvataan tukikerroksen sisältämän hienoaineksen lähteitä ja sen epäedullisia vaikutuksia tukikerrokselle. Luvuissa 3 ja 4 selvitetään maatutkaluotauksen teoriaa. Maatutkasignaalin etenemiseen ja vaimenemiseen vaikuttavien tekijöiden ohella selvitetään tukikerroksen hienoaineksen vaikutuksia signaalin taajuussisältöön. Luvussa 4 kerrotaan, miten maatutkatekniikkaa on hyödynnetty rataympäristössä tehtävissä tutkimuksissa Suomessa ja maailmalla. Luvussa 5 kuvataan tehdyt kenttä- ja laboratoriotutkimukset ja luvussa 6 esitetään saadut tulokset. Lopuksi luvussa 7 esitetään päätelmät saaduista tuloksista ja jatkotutkimusehdotukset.

Työssä tehtävät tutkimukset käsittelevät pelkästään tukikerrosta. Maatutkamittauksissa käytetään tavanomaisen pulssitutkan rinnalla uutta moniantennitekniikkaan perustuvaa 3D-maatutkaa, joka lähetystaajuus on 100–2000 MHz. Tässä työssä käsitellään vain 3D-maatutkamittauksia ja niistä saatuja tuloksia. Lisäksi on huomioitavaa, että saatuja tuloksia voidaan verrata vain betoniratapölkkyratoihin, koska maatutkamittauksia ei tehty puuratapölkkyalueilla.

## 2 RADAN RAKENNE

### 2.1 Radan rakenneosat

Radan rakenne jaetaan päällysrakenteeseen ja alusrakenteeseen. Kuvassa 2.1 on esitetty radan rakenteeseen liittyvät nimitykset. Radan päällysrakenne käsittää raiteen ja tukikerroksen. Raide koostuu ratakiskoista, ratapölkkyistä, kiskon kiinnitys- ja jatkos-osista, vaihteista ja muista raiteen erikoisrakenteista. Radan alusrakenteeseen kuuluvat välikerros, eristyskerros sekä mahdollinen suodatinkerros ja routalevyt. (Puikkonen, 1989; Ratahallintokeskus, 2002).



Kuva 2.1 Radan rakennennimityksiä (Ratahallintokeskus, 2002)

Radan rakenteesta on laadittu normaalipoikkileikkauksia (Ratahallintokeskus, 2002), joita on eri tyyppejä riippuen sallitusta nopeudesta sekä siitä, onko kyseessä penger, maaleikkaus vai kallioleikkaus. Tämän lisäksi kaksiraiteisille radoille on omat normaalipoikkileikkauksensa.



## 2.2 Radan tukikerros

### 2.2.1 Yleistä

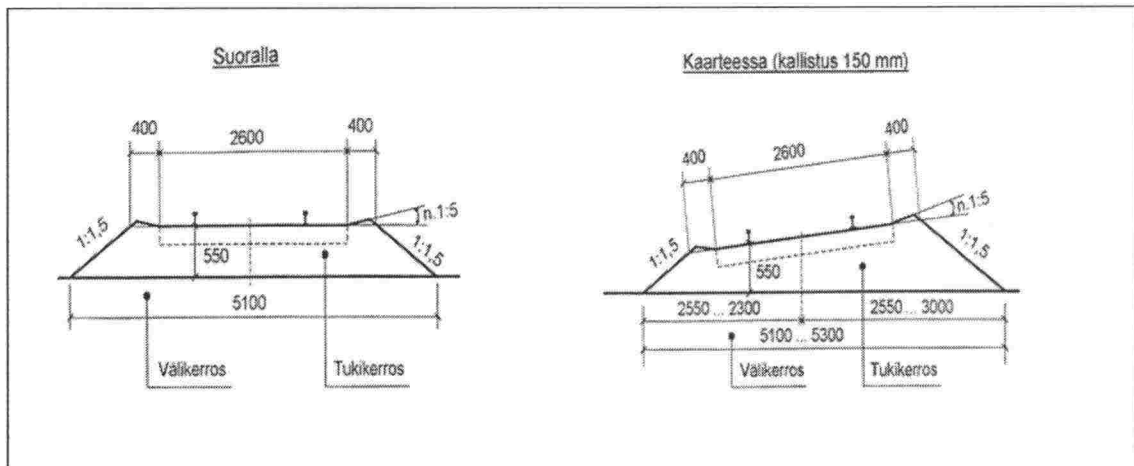
Tukikerros muodostaa yhdessä raiteen kanssa radan päällysrakenteen. Tukikerros-materiaalina käytetään tavallisesti kalliokiviaineksesta tehtyä raidesepeliä. Vähäliikenteisillä rataosilla käytetään myös raidesoraa. Raidesepeli on kiviainesta, jonka rakeiden pinnat ovat 100 % murskaantuneita ja jonka raekoko  $d/D$  on 31,5/63 mm tai erikoistapauksissa 31,5/50 mm (Ratahallintokeskus, 2004; SFS-EN 13450, 2004).

### 2.2.2 Tukikerroksen mitat

Tukikerroksen mitat määräytyvät rataluokan, suurimman sallitun nopeuden, kiskonpituuden sekä tukikerrosmateriaalin ja ratapölkkytyypin perusteella (Ratahallintokeskus, 2004).

Jatkuvakiskoraiteessa (kiskon pituus on yli 300 metriä) tukikerroksen paksuus on 450 mm puuratapölkkyosuuksilla ja 550 mm betoniratapölkkyosuuksilla nopeudesta riippumatta. Vaihdealueilla tukikerroksen paksuus on aina 550 mm (Ratahallintokeskus, 2002). Tukikerroksen paksuus mitataan korkeusviivan tasosta eli kiskon alapinnan tasosta alaspäin. Kallistetussa raiteessa tukikerroksen paksuus mitataan alemman kiskon kohdalta. Jatkuvakiskoraiteessa käytetään ratapölkkyjen päiden ulkopuolella palleita (kuva 2.1), jonka tarkoituksena on lisätä tukikerroksen kykyä ottaa vastaan raiteesta siihen kohdistuvat voimat. Palletta lukuun ottamatta tukikerroksen pinta saa olla korkeintaan ratapölkkyjen yläpinnan tasolla (Ratahallintokeskus, 2002).

Myös tukikerrokselle on laadittu normaalipoikkileikkauksia. Kuvassa 2.2 on esimerkki tukikerroksen normaalipoikkileikkauksesta, kun sallittu nopeus on enintään 160 km/h (Ratahallintokeskus, 2002).



Kuva 2.2 Tukikerroksen normaalipoikkileikkaus jatkuvakiskoissa betoniratapölkkyraiteessa, kun sallittu nopeus on enintään 160 km/h (Ratahallintokeskus, 2002).

### 2.2.3 Tukikerroksen tehtävät

Tukikerroksella on monta tehtävää, joilla on suuri merkitys radan toiminnalle. Tukikerroksen tärkeimmät tehtävät ovat:

- ratapölkyistä välittyvän liikennekuormituksen jakaminen alempien rakennekerrosten sallimalle tasolle
- raiteen tukeminen pysty- ja vaakageometrian säilyttämiseksi (Nurmikolu, 2004; Selig & Waters, 1994).

Muita tehtäviä ovat:

- sisältää riittävästi huokostilaa, jotta hienoaines ja valumavedet voivat valua pois tukikerroksesta
- olla helposti tuettavissa, jolloin poikkeamat radan geometriassa ovat korjattavissa esimerkiksi tuennalla
- vaimentaa liikenteen melua
- turvata riittävä sähkönvastustuskyky kiskojen välillä
- ottaa vastaan liikenteestä aiheutuvaa dynaamista energiaa ja vaimentaa siten tärinää (Nurmikolu, 2004; Selig & Waters 1994).

### 2.2.4 Tukikerrosmateriaalilta vaaditut ominaisuudet

Tukikerrosmateriaalilta vaaditaan useita ominaisuuksia, joita ovat mm. hyvä iskun- ja kulutuksenkestävyys, terävasärmäinen raemuoto ja sopiva raekokojakauma, mahdollisimman pieni kemiallinen ja mekaaninen rapautumisalttius, mahdollisimman vähäinen hienoainespitoisuus ja kiviaineksesta syntyvän hienoaineksen hyvä vedenläpäisevyys ja huono vedensitomiskyky (Nurmikolu, 2004).

Ratahallintokeskus on alkanut vaatia 1.1.2006 alkaen kaikilta raidesepelitoimituksilta CE-merkinnän (Ratahallintokeskus, 2005a). CE-merkintävaatimukset on esitetty taulukossa 2.1. Vaatimukset sisältävät kaikki raidesepelin käytön kannalta olennaiset ominaisuudet.



*Taulukko 2.1 Raidesepelin CE-merkintävaatimukset Suomessa (Ratahallintokeskus, 2005a).*

| <b>Olennaiset ominaisuudet</b>     | <b>Vaatimusten kohdat standardissa SFS-EN 13450</b>  | <b>Vaatimustaso Suomessa</b>  |
|------------------------------------|--|---|
| Raemuoto, raekoko ja kiintotiheys  | 6.2 Raidesepelin raekoko<br>6.3 Rakeisuus<br>6.4 Kiviaineksen raemuoto<br>7.4.2 Kiintotiheys | 31,5/63 tai 31,5/50<br>Luokat C, E ja F<br>Luokka SI20<br>Ilmoitettu arvo                               |
| Iskunkestävyys                     | 7.2 Iskunkestävyys   | Luokat<br>LARB12<br>LARB16<br>LARB20  |
| Kulutuskkestävyys                  | 7.3 Kulutuskkestävyys  | Luokka<br>MDERB 11  |
| Puhtaus                            | 6.5 Hienoaineksen määrä  | Luokka B  |
| Vaarallisten aineiden vapautuminen | 1.3.3 Tiedot raaka-aineesta<br>1.4 Tuotannon johtaminen                                      | Ei saa sisältää haitallisessa määrin sähköä johtavia mineraaleja *)                                     |
| Jäädytys-sulatuskestävyys          | 7.4.1 Jäädytys-sulatuskestävyys  | Vedenimeytyminen $W_{cm} < 0,5\%$<br>Jos $W_{cm} > 0,5\%$ , tehdään jäädytys-sulatustesti SFS-EN 1367-1 |

\*) Ohutuksesta määritettyjen kiisumineraalien (magneetti-, rikki- ja kuparikiisuus), rautaoksidien (esim. magnetiitti) ja grafiitin määrä ei saa olla suurempi kuin 5 %

Taulukossa 2.1 esitettyjen vaatimusten lisäksi raidesepelin mineraalikoostumukselle on laadittu yleistetyt vaatimukset, joista poikkeaminen edellyttää kiviaineskohtaisia lisäperusteluja esimerkiksi kiviaineksen rakenteesta tai mineraalien edullisesta yhteenliittymistavasta. Raidesepeli ei saa sisältää haitallisissa määrin sähköä johtavia mineraaleja. Opaakkimineraaleja (sulfideja, kiisuja, oksideja tai grafiittia) kiviaines saa sisältää enintään 3 %. Jos opaakkimineraalit voidaan malmimikroskooppisin tutkimuksin varmuudella todeta oksideiksi, voidaan niitä sallia enintään 5 %. Pehmeiden rapautumis- ja muuttumistuotteiden (esim. kloriitti ja talkki) yhteenlaskettu osuus raidesepelikiviaineksessa ei saa ylittää 5 %. Helposti liukenevia ja murenevia karbonaattimineraaleja (kalsiitti, dolomiitti) ei saa kasaumina olla 5 % enempää, hajallaan korkeintaan 10 %. Muiden pehmeiden mineraalien, erityisesti kiilteiden, sekä kaikkien edellä mainittujen mineraalien yhteenlaskettu osuus ei saa ylittää 20 %. Jos kiille esiintyy pakkoina tai muunlaisina suuntautuneina kasaumina, sen osuus kiviaineksen mineraalikoostumuksessa saa olla enintään 15 % (Ratahallintokeskus, 2005b).

Los Angeles -testillä määritetty iskunkestävyysluokka valitaan radan liikennemäärän mukaan. Huomioitavaa on myös hienoaineksen massan läpäisyprosentti 0,063 mm seulalla, mikä saa olla korkeintaan 1,0 % pesuseulonnassa määritettynä (Ratahallintokeskus, 2005a). Hienoainesvaatimusta sovelletaan vain raidesepelin tuotanto-paikalta otetuille näytteille (SFS-EN 13450, 2004).

Taulukossa 2.2 on esitetty raidesepelin rakeisuusluokat. Suomessa käytetään rakeisuusluokkia C, E ja F. (SFS-EN 13450, 2004)

1. Luokka F, pääradoilla
2. Luokka C, kuormaus- ja vaihtotyöalueilla
3. Luokka E, uusioraidesepeli, johon on lisätty luokan F raidesepeliä; vähäliikenteiset radat ja sivuradat, joiden vuotuinen liikenne < 1 Mbrt

*Taulukko 2.2 Raidesepelin rakeisuusluokat (SFS-EN 13450, 2004).*

| Seulan koko<br>mm | Raidesepelin raekoko 31,5...50 mm |          |          | Raidesepelin raekoko 31,5...63 mm |         |         |
|-------------------|-----------------------------------|----------|----------|-----------------------------------|---------|---------|
|                   | Läpäisy massaprosentteina         |          |          |                                   |         |         |
|                   | Rakeisuusluokka                   |          |          |                                   |         |         |
|                   | A                                 | B        | C        | D                                 | E       | F       |
| 80                | 100                               | 100      | 100      | 100                               | 100     | 100     |
| 63                | 100                               | 97...100 | 95...100 | 97...99                           | 95...99 | 93...99 |
| 50                | 70...99                           | 70...99  | 70...99  | 65...99                           | 55...99 | 45...70 |
| 40                | 30...65                           | 30...70  | 25...75  | 30...65                           | 25...75 | 15...40 |
| 31,5              | 1...25                            | 1...25   | 1...25   | 1...25                            | 1...25  | 0...7   |
| 22,4              | 0...3                             | 0...3    | 0...3    | 0...3                             | 0...3   | 0...7   |
| 31,5...50         | ≥ 50                              | ≥ 50     | ≥ 50     | -                                 | -       | -       |
| 31,5...63         | -                                 | -        | -        | ≥ 50                              | ≥ 50    | ≥ 85    |

Huom. 1. Seulan 22,4 mm läpäisylle asetetut vaatimuksia sovelletaan vain tuotantopaikalta otetuille raidesepelinäytteille

Huom. 2. Tietyissä olosuhteissa 25 mm seulaa voidaan käyttää 22,4 mm seulan sijasta, tällöin raja-arvona käytetään 0...5 (0...7 luokassa F)

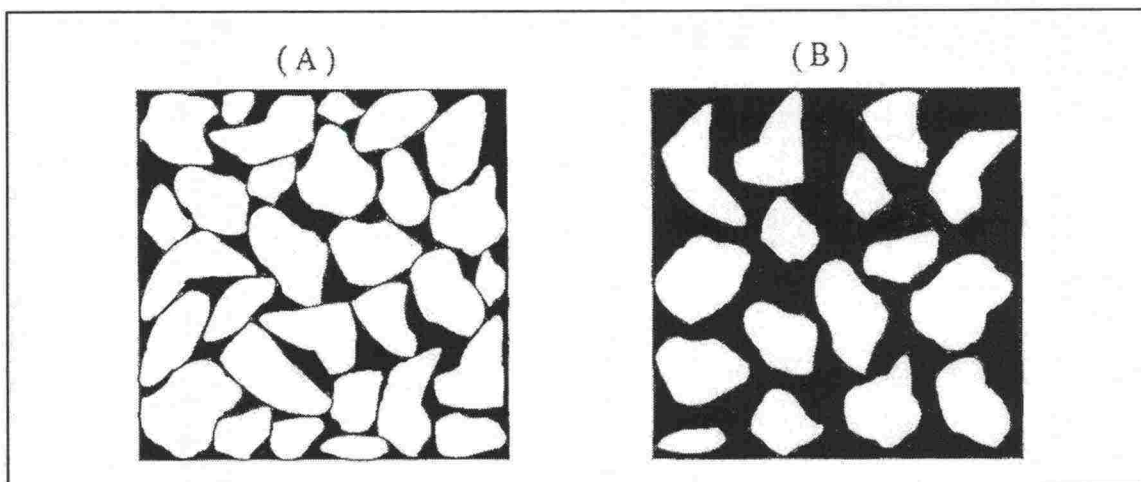
Taulukosta 2.2 nähdään, että pääradoilla käytettävässä rakeisuusluokan F raidesepelissä vähintään 85 % rakeista tulee sijoittua välille 31,5–63 mm. Lisäksi nähdään, että pääradoilla käytettävässä sepelissä alle 31,5 mm raekokoja saa olla enintään 7 massaprosenttia. Raidesepeli, joka sisältää aiemmin radalla ollutta sepeliä ja luokan F raidesepeliä, kuuluu luokkaan E, jossa sallitaan pienempi keskimääräinen raekoko kuin luokassa F.

## 2.3 Hienoaines tukikerroksessa

### 2.3.1 Hienoaineksen vaikutukset tukikerrokselle

Hienoaineksella tarkoitetaan 0,063 mm raekokoa pienempää ainesta. Liian suuren hienoainesmäärän seurauksena tukikerroksen mahdollisuudet toteuttaa siltä vaadittuja tehtäviä heikkenee. Suorituskyvyn heikkeneminen riippuu suuresti hienoaineksen määrästä ja laadusta (Nurmikolu, 2005; Selig & Waters 1994).

Vähäisillä hienoainespitoisuuksilla karkearakeiset partikkelit pääsevät kosketuksiin toistensa kanssa, jolloin kuormitus välittyy näiden kautta alusrakenteeseen (kuva 2.3a). Hienoaineksen ja pienikokoisten partikkelien lisääntyessä niin paljon, että ne eivät mahdu karkeampien rakeiden välisiin tyhjätiloihin, karkearakeisemmat partikkelit menettävät keskinäisen kontaktinsa (kuva 2.3b). Tällöin materiaali toimii käytännössä hienorakeisen aineksen ominaisuuksien määräämänä (Kolisoja, 1997).



Kuva 2.3 Hienoaineksen määrän vaikutus karkearakeisen materiaalin toiminnalle (Kolisoja, 1997).

Toinen hienoaineksen haitallinen vaikutus materiaalin toiminnalle liittyy hienoaineksen kykyyn sitoa vettä materiaaliin. Runsaasti vettä sitova hienoaines saattaa luoda edellytykset huokosveden ylipaineen kehittymiselle kuormituksen alaisena. Huokosveden paine pienentää partikkelien välisiä tehokkaita jännityksiä, ja siten mahdollistaa painumien lisääntymisen kuormituksen alla. Hienoaineksen määrän kasvu lisää vielä entisestään materiaalin hienontumista ja palautumattomia muodonmuutoksia (Selig & Waters, 1994; Nurmikolu, 2004).

Huomioitavaa on myös, että radan rakennekerrosmateriaalien tulee olla routimattomia, joten hienoaineksen määrä ja laatu eivät saa luoda edellytyksiä materiaalin routimiselle (Nurmikolu, 2004).

Kun hienoaineksen määrä on tarpeeksi suuri, radan ylläpitotoimien, kuten esimerkiksi tukemisen, tehokkuus pienenee merkittävästi. Lopulta tukikerrokselle joudutaan tekemään puhdistustoimenpiteitä. Viimeisenä vaihtoehtona on koko tukikerroksen vaihtaminen.

Tukikerroksen puhdistus tehdään, kun materiaali on saavuttanut puhdistusrajan. Puhdistusrajalla tarkoitetaan sellaista tukikerroksen tilaa, jossa hienorakeisen materiaalin poistaminen tukikerroksesta on edullisin kunnossapitoratkaisu. Hienorakeinen materiaali poistetaan tukikerroksesta sepelinpuhdistuskoneella. Puhdistuskoneen kaivuterät irrottavat tukikerrosta ja vetävät sen kuljetinhihnalle, joka kuljettaa aineksen seulontalaitteeseen. Se osa aineksesta, joka ei läpäise seulaa, palautetaan takaisin rataa (Selig & Waters, 1994). Suomessa sepelin puhdistuksessa rataa palautetaan 25 mm seulalle jäävät rakeet.

Suomessa puhdistusrajan arvioinnissa käytetään tukikerrosnäytteistä 1 mm, 8 mm ja 25 mm läpäisyprosenttien summana määritettyä rakeisuuslukua. Teoreettinen puhdistusraja saavutetaan, kun tämä läpäisyprosenttien summa ylittää arvon 88 (Uusi-Luomalahti, 1994).



### 2.3.2 Hienoaineksen lähteet

Raidesepeli saa sisältää alle 0,063 mm rakeita enintään 1,0 massaprosenttia (taulukko 2.1) ja alle 31,5 mm rakeita enintään 7,0 massaprosenttia (taulukko 2.2). Radassa hienorakeisen aineksen määrä kuitenkin kasvaa olosuhteista ja kiviaineksen ominaisuuksista riippuen. Taulukossa 2.3 hienorakeisen aineksen lähteet on jaoteltu neljään luokkaan.

*Taulukko 2.3 Hienorakeisen aineksen lähteet tukikerroksessa (Nurmikolu, 2004; Selig & Waters, 1994).*

|   |   |
|---|---|
| 1. Kiviaineksen hajoaminen                            |   |
| - sepelin käsittely                                   |   |
|   | I Louhoksella   |
|   | II Kuljetuksen aikana   |
|   | III Rataan asennettaessa                                      |
|   | IV Tiivistämisen yhteydessä                                   |
| - liikennekuorman vaikutus                            |   |
|   | I Toistuva kuormitus  |
|   | II Tärinä   |
|   | III Syntyneen hienoaineksen hiova yhteistoiminta veden kanssa |
| - kemiallinen rapautuminen                            |   |
| - fysikaalinen rapautuminen                           |   |
| - tukemisen ja muun kunnossapidon vaikutus            |   |
| 2. Ulkoiset lähteet                                   |   |
| - vaunuista pudonnut materiaali                       |   |
| - tuulen kuljettama materiaali tukikerroksen pinnalle |   |
| 3. Ratapölkyn kuluminen                               |   |
| 4. Alusrakenteen tunkeutuminen                        |   |

Hienoaineksen laatu riippuu sen syntytavasta ja alkuperästä. Hienoaineksille tehtyjen tutkimuksien mukaan (Nurmikolu, 2006) Suomen rataverkolla olevien raidesepelikiviainesten hienoneminen on pääasiallisesti seurausta liikennekuormituksen ja tukemisen aiheuttamasta rakeiden mekaanisesta lohkeamisesta ja hioutumisesta. Kemiallista rapautumista ei juurikaan havaittu. Tällöin voidaankin todeta, että tukikerrokseen syntyvä hienoaines on laadullisesti yleensä varsin samankaltaista.

Ulkomaisen tutkimuksen (Selig & Waters, 1994) mukaan valtaosa, eli noin 76 % tukikerroksen hienoaineksesta on syntynyt sepelin hajoamisen takia. Tulosta ei voi täysin verrata Suomen oloihin, koska tuloksissa on myös pohjamaasta peräisin olevaa hienoainesta, mikä Suomen rakennepaksuuksien takia ei ole mahdollista.

Huomioitavaa on tukemisen vaikutus sepelin hienontumiseen. Tukeminen tapahtuu raidetta nostamalla ja työntämällä koneellisesti sepeliä ratapölkyn alle siten, että raiteelle saadaan haluttu asema. Tukemiskoneen hakut rikkovat sepeliä niiden työntyessä tukikerrokseen. British Railin (BR) tutkimuksen mukaan tukemisen yhteydessä särkyneen hienorakeisen aineksen (< 14 mm) osuudeksi saatiin 20 % kaikesta tukikerroksen hienorakeisen aineksen lähteistä. Tukemisen merkittävä raidesepeliä hienontava vaikutus on havaittu myös kotimaisessa tukikerroksessa (Nurmikolu, 2000; Uusi-Luomalahti, 1994). Sen lisäksi, että tukeminen rikkoo raidesepeliä, sillä on

myös tukikerrosta löyhdyttävä vaikutus, mistä seuraa huomattavat painumat heti tukemisen jälkeen (Selig & Waters, 1994).

### 2.3.3 Tukikerroksen hienontuneisuuden arviointi

#### Manuaalinen näytteenotto

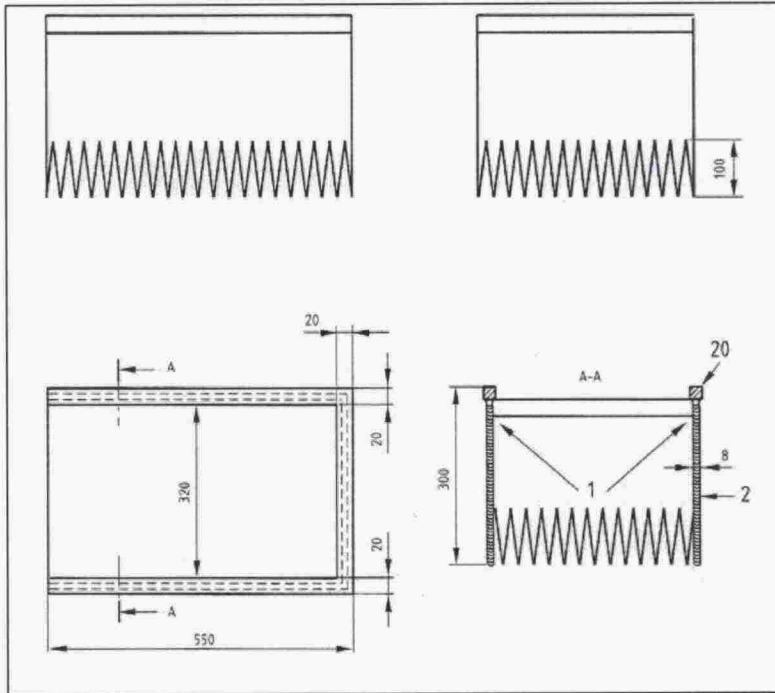
Hienontuneisuuden arviointi Suomessa perustuu tällä hetkellä radasta otettujen näytteiden analysointiin. Ratahallintokeskuksen edellyttämä näytteenotto tapahtuu tukikerroksen laadun tutkimusohjeen mukaisesti tasolta kv - 0,30...0,40 m yhden kilometrin välein (Ratahallintokeskus, 1997). Näytteet seulotaan ja seulontatuloksista lasketaan yhteen 1, 8 ja 25 mm läpäisyprosentit. Saatu summa on kyseisen näytteen rakeisuusluku.

Eri rataosuuksilla tehdyissä rakeisuuslukututkimuksissa on rakeisuusluvun havaittu vaihtelevan suuresti jopa peräkkäisiltä kilometreiltä otettujen näytteiden välillä, vaikka tukikerros koostuisi samasta kiviaineksesta. Näytteenottomenetelmä on havaittu olevan arka varsinkin näytteenottotason vaihteluille, mutta sen epätarkkuudet eivät selitä suuria rakeisuusluvun vaihteluita (Nurmikolu, 2000). Mainitun vaihtelun vuoksi noin kilometrin välein otettujen näytteiden perusteella voidaan arvioida ainoastaan raidesepelin hienontuneisuutta rataosalla keskimäärin (Nurmikolu, 2006).

Tukikerroksen toimintakyvyn voidaan arvioida heikkenevän erityisesti kaikkein hienoimpien raekokojen määrän kasvaessa. Tutkimuksissa (Nurmikolu, 2006) onkin pohdittu 25 mm seulan läpäisyprosentin mukanaoloa rakeisuusluvun määrittämisessä. Tulevaisuudessa raidesepelien kunnon vertailu hankaloituu, kun joudutaan arvioimaan vuodesta 1995 käytetyn raekooltaan 31,5/63 mm raidesepelin hienontuneisuutta. Tällöin saadaan 25 mm seulan läpäisyprosentiksi huomattavasti pienempi arvo verrattuna vuoteen 1995 asti käytettyyn raekooltaan 25/55 mm raidesepeliin, jossa alkuperäinen raekokojakauma on ollut suoraan 25 mm:stä ylöspäin. Parempana tukikerroksen toimintakykyä vastaavana tekijänä voitaisiinkin pitää 8 mm ja 1 mm läpäisyprosenttien summaa, vaikkakin raekooltaan alle 0,063 mm aines on vahingollisin raekoko tukikerrokselle muun muassa sen vedensitomiskyvyn takia.

Standardissa SFS-EN 13450 näytteenotossa opastetaan käytettäväksi kuvan 2.4 mukaista teräskehikkoa (550 x 320 mm). Ensin raidesepeli poistetaan sepelitalikolla ja sen jälkeen kehikkoa lyödään, esimerkiksi lekalla, syvemmälle sepeliin. Lyöntien välillä kerätään näytettä kehyksen sisältä sen tunkeutuvuuden parantamiseksi. Analysoitavaksi näytteeksi tulee ottaa kaikki kehyksen sisään jäävä materiaali kaiken hienoaineksen saamiseksi näytteeseen (SFS-EN 13450, 2003).





Kuva 2.4 Näytteenottokehikko (SFS-EN 13450, 2003)

### Koneellinen näytteenotto

Vaihtoehtoisessa näytteenottomenettelässä tukikerrosnäyte otetaan sydännäytekairaukseen verrattavalla poralla. Sydännäyte voi ulottua lähes 1,5 m syvyyteen, joten sillä on mahdollista saada näytteitä myös väli- ja eristyskerroksista. Sydännäytekairaukseen perustuva menetelmä on käytössä Ruotsissa. Alla olevassa kuvassa 2.5 on esitetty Ruotsissa käytössä oleva raidesepelinäytteenottokone MUM 9601 (<http://banverket.se>).



Kuva 2.5 Raidesepelinäytteenottokone MUM 9601 (<http://banverket.se/uploads/pdf/industridivisionen/entreprenad/Markundersokning.pdf>).



### 3 MAATUTKALUOTAUKSEN TEORIA

#### 3.1 Maatutkaluotauksen historia rautateillä

Suomessa maatutkatekniikkaa on kokeiltu rautateillä ensimmäisen kerran 1980-luvun puolivälissä. Ensimmäiset tulokset eivät olleet rohkaisevia mittaamiseen ja aineiston prosessointiin liittyvien ongelmien takia. Maatutka alkoi yleistyä rataympäristössä 1990-luvun puolivälissä. Ensimmäiset julkaisut onnistuneista ratamittauksista tulivat Sveitsistä (Hugenschmidt, 1998) ja Isosta-Britanniasta (Gallagher, 1999). Vuodesta 1998 lähtien onkin julkaistu useita julkaisuja maatutkamittauksista rautateillä. Menetelmää on käytetty mm. Pohjois-Amerikassa (Olhoeft & Selig, 2002; Sussmann et al, 2002), Isossa-Britanniassa (Clark et al, 2003), Ruotsissa (Smekal et al, 2003) ja Suomessa (Saarenketo et al, 2006) (Silvast & Nurmikolu, 2005).

#### 3.2 Maatutkatekniikka

##### 3.2.1 Maatutkaluotauksen periaate

Suurin osa käytössä olevista tutkista on perinteisiä pulssitutkia. Muita tutkatyyppejä ovat esimerkiksi 3D-laitteistojen käyttämä askeltaajuustutka ja taajuusmoduloitu-jatkuva-aaltotutka.

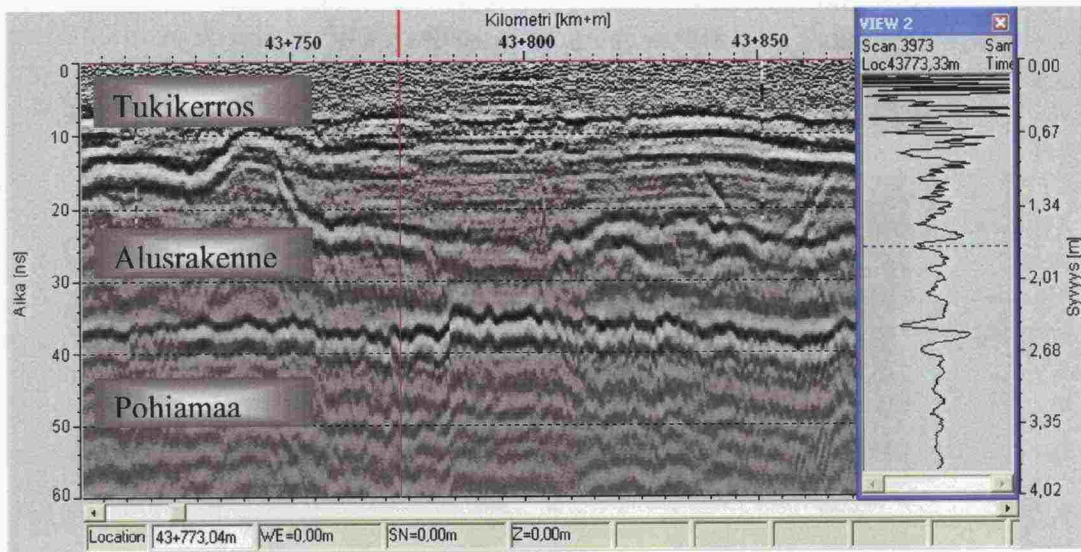
Pulssitutkaperiaatteella toimiva maatutka voidaan jaotella neljään eri komponenttiin, joilla jokaisella on oma tehtävä maatutkan käytön kannalta (Saarenketo & Maijala, 2000):

1. Pulssigeneraattori, joka määrää lähetettävän signaalin pituuden, voimakkuuden ja toistotaajuuden
2. Lähetinantenni, joka lähettää signaalin väliaineeseen
3. Vastaanotinantenni, joka kerää rajapinnoista palaavat signaalit ja vahvistaa ne
4. Näytteenotin, joka muuntaa heijastuneet signaalit sellaiseen muotoon, missä ne voidaan taltioida tallentimelle.

Pulssitutkalaitteen antenni lähettää väliaineeseen lyhytkestoisen sähkömagneettisen signaalin radioaaltotaajuudella ( $f < 3000$  GHz), jonka pituus on antennin lähetystaajuudesta riippuen nanosekunnista kymmeniin nanosekunteihin. Yleisesti käytettävä signaalin taajuusalue on 10–3000 MHz, koska näillä taajuuksilla signaali etenee aaltolina sähköisesti eristeisessä väliaineessa. Kun tämä aalto kohtaa väliaineessa olevan sähköisen rajapinnan, osa signaalista heijastuu takaisin, osa jatkaa etenemistään rajapinnan jälkeen ja heijastuu seuraavilta rajapinnoilta optiikan lakeja noudattaen. Antenni vastaanottaa takaisin heijastuneen signaalin ja tutkalaite mittaa lähtöhetkestä paluuhetkeen kuluneen ajan sekä signaalin amplitudin. Antennin liikkeessa mittauksia toistetaan nopeassa tahdissa. Tuloksena saadaan piirrettyä yksittäisten pulssien heijasteista jatkuva luotausprofiili eli tutkakuva, jossa erottuu väliaineessa olevat sähköiset rajapinnat. (Suomen geoteknillinen yhdistys (SGY), 1991; Saarenketo & Maijala, 2004).

Kuvassa 3.1 on esitetty maatutkaprofiili ratarakenteesta. Rakenteen kerrosrajat erottuvat sähköisten rajapintojen avulla. Kuvan oikeassa reunassa on lisäksi esitetty yksittäinen

maatutkasignaali. Signaalista nähdään, että voimakkaat amplitudit muodostuvat rajapintojen heijasteiden kohdille.



Kuva 3.1 Esimerkki maatutkaprofilista, jossa näkyvät eri rakennekerrosten rajapinnat. Kuvassa oikealla on esitetty yksittäinen maatutkasignaali maatutkaprofilin violetin viivan kohdalta.

Perinteiset pulssitutka-antennit voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan, ilmavasteantenneihin ja maavasteantenneihin. Taulukossa 3.1 on esitetty antenniluokkiin kuuluvat antennit ja niiden taajuudet. Maavasteantennien lähetystaajuus vaihtelee normaalisti 80–1500 MHz välillä. Maavasteantenneilla on ilmavasteantenneja parempi syvyysulottuvuus, mikä maavasteantenneilla on 3–30 m. Ilmavasteantennien lähetystaajuudet ovat korkeampia kuin maavasteantennien. Niiden taajuudet vaihtelevat 500–2500 MHz välillä. Ilmavasteantennien yleisesti käytetty lähetystaajuus on 1,0 GHz. Ilmavasteantennien syvyysulottuvuus on normaalisti vain noin 0,5–0,9 m ja siksi niitä on käytetty lähinnä tie- ja siltatutkimuksissa (Saarenketo & Maijala, 2004).

Taulukko 3.1 Maatutka-antennien ominaisuuksia (Saarenketo & Maijala, 2004).

| Antennit                 | Taajuus (MHz) | Syvyysulottuvuus (m) |
|--------------------------|---------------|----------------------|
| <b>Maavasteantennit</b>  |               |                      |
| - Korkeataajuiset        | 900–1500      | 0,4–1,0              |
| - Keskitajuiset          | 400–600       | 1,5–4,0              |
| - Matalataajuiset        | 50–200        | 3,0–30,0             |
| <b>Ilmavasteantennit</b> |               |                      |
| - Korkeataajuiset        | 2000–         | 0,4–0,6              |
| - Keskitajuiset          | 900–1200      | 0,5–1,0              |
| - Matalataajuiset        | 400–600       | 1,0–3,0              |

### 3.2.2 3D-tekniikka

Tavanomaisten 2D-maatutkaluotausmenetelmien rinnalle on kehitetty ns. moniantennitekniikka eli 3D-maatutkaluotausmenetelmä. 3D-menetelmällä voidaan tutkia alus- ja

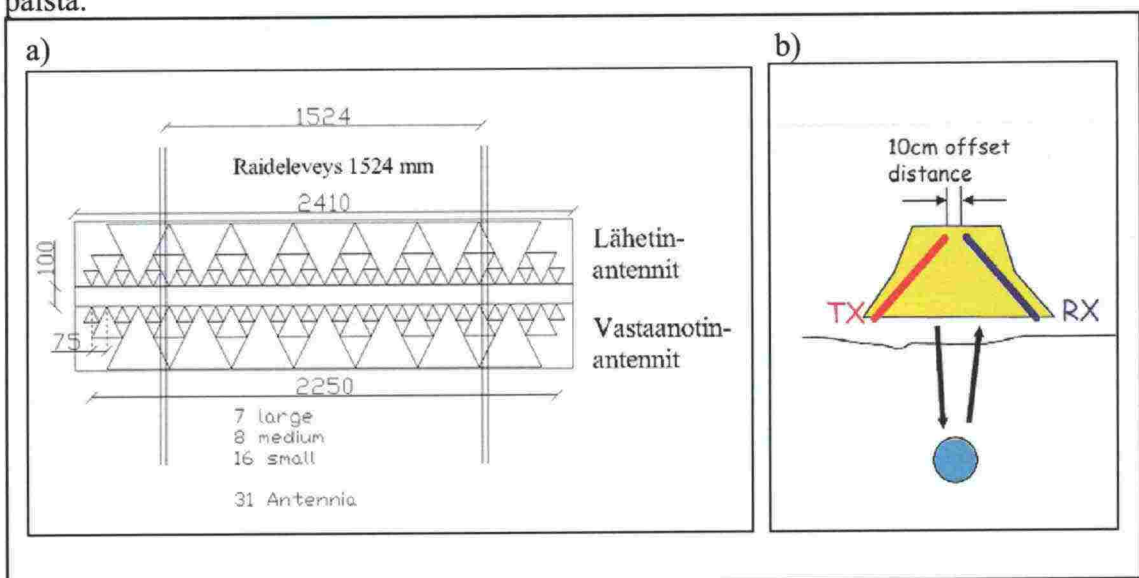


päällysrakenteiden ominaisuuksia ja rajapintoja useasta eri pisteestä pituus- ja poikkisuunnassa. Kun tavanomaisella 2D-maatutkalaitteistolla voidaan mitata esimerkiksi korkeintaan kaksi mittalinjaa kerralla, 3D-menetelmällä voidaan mitata jopa 31 vierekkäistä linjaa samanaikaisesti. 3D-menetelmällä saadaan mittausaineistoa tutkittavasta kohteesta koko antennin leveydeltä ja siten kohteesta pystytään luomaan 3-ulotteisia malleja. Kuvassa 3.2 on esitetty tässä työssä käytetty norjalaisvalmisteinen 3D-antenni.



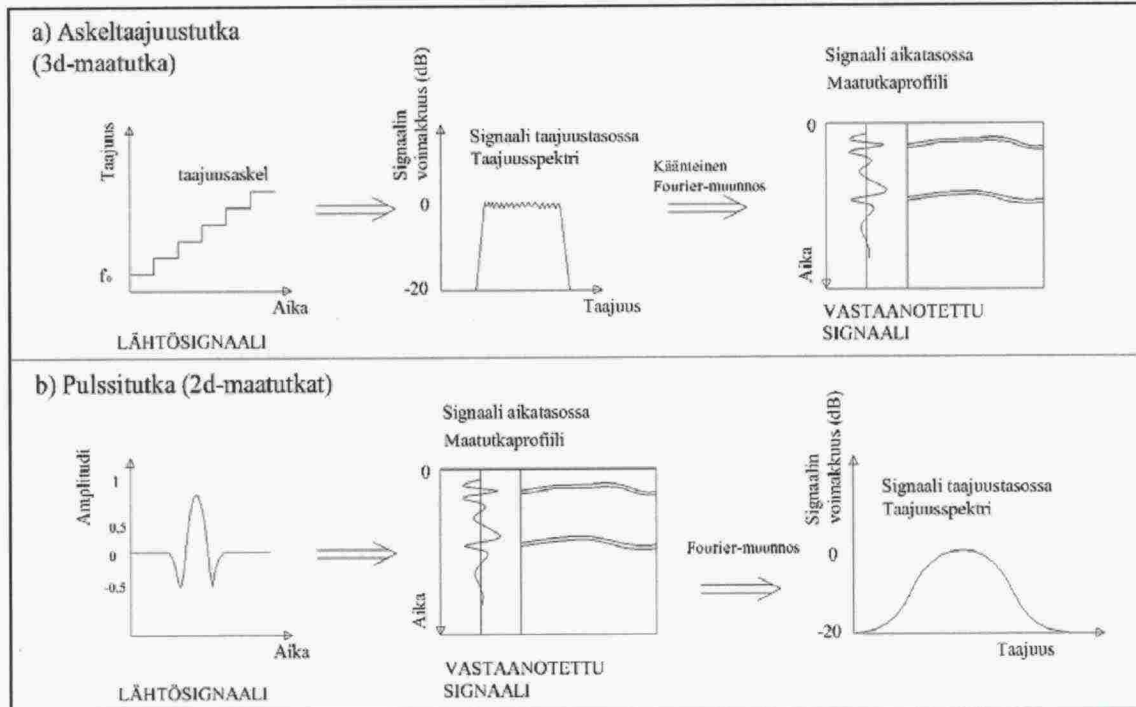
Kuva 3.2 Norjalaisen 3d-radar As:n kehittämä 3D-antenni.

Kuvissa 3.3a ja 3.3b on esitetty kyseisen 3D-antennin periaatekuva ja poikkileikkaus. Antennissa on 31 paria lähetin-vastaanotinantenneja, jotka ovat 75 mm sivuetaisyysdellä toisistaan. Lähetinantenni lähettää signaalin maahan ja vastaanotinantenni vastaanottaa rajapinnoista palaavat signaalit. Näitä antennipareja on kolmea eri kokoa, yhteensä 7 isoa (large), 8 keskikokoista (medium) ja 16 pientä (small). Isojen antennien lähetystaajuus on matalampi kuin pienien, joten isommilla antenneilla on pieniä parempi syvyysulottuvuus. Kuvasta nähdään myös, että ratamittauksissa 3D-antennilla mittausaineistoa saadaan niin raiteen keskeltä kuin myös kiskojen ulkopuolelta pölkkyjen päistä.



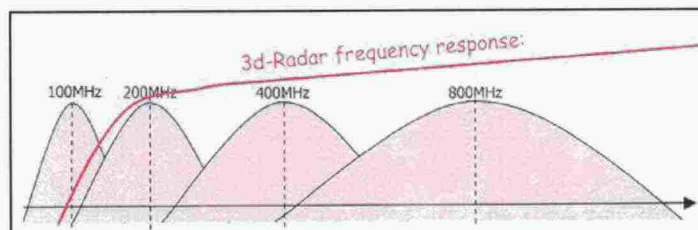
Kuva 3.3 a) 3D-antennin periaatekuva b) 3D-antennin poikkileikkaus (3d-radar As, 2006).

3D-maatutka on ns. askeltaajuustutka. Askeltaajuustutkan toimintaperiaate on kuvattu kuvassa 3.4a. Askeltaajuustutka toimii taajuustasossa, missä se lähettää kaikkia lähetystaajuuksia yhtä kauan. Signaali muutetaan jälkiprosessoinnilla aikatasoon, josta voidaan luoda maatutkaprofiili. Vastaavasti pulssitutka toimii suoraan aikatasossa (kuva 3.4b). Koska askeltaajuustutka lähettää kaikkia lähetystaajuuksia yhtä kauan, sen taajuusspektri saadaan määritettyä paremmin ja se on tasaisempi kuin pulssitutkan. Pulssitutka lähettää tietyllä keskitaajuudella olevan pulssin, jossa pieniä ja suuria taajuuksia on vähemmän kuin keskitaajuuksia, joten sen taajuusspektri on epätasaisempi.



Kuva 3.4 a) Askeltaajuustutkan ja b) pulssitutkan periaate.

Kuvan 3.2 3D-maatutkalaitteiston antennin lähetystaajuus on 100–2000 MHz lähettäen jokaista taajuusarvoa yhtä kauan. Vastaavasti esimerkiksi 400 MHz antennin lähetystaajuus on noin 200–800 MHz keskitaajuuden ollessa 400 MHz. (kuva 3.5). Suuremman taajuusalueen takia 3D-antenni on tavanomaisia 2D-pulssitutka-antenneja monikäyttöisempi.



Kuva 3.5 3D-antennin lähetystaajuuden kattavuus verrattuna perinteisiin 2D-antenneihin (3d-radar As, 2006).

3-ulotteinen mittausmenetelmä sopii erityisen hyvin kohteisiin, joissa halutaan saada tarkkaa tietoa rakenteista myös poikkisuunnassa. Tarkoissa detaljitutkimuksissa



saatetaan edellyttää jopa alle 10 km/h nopeutta laitteistolle, mikä voi asettaa tiettyjä rajoituksia tarkoille mittauksille suurissa mittauskohteissa. Mittausta voidaan kuitenkin huomattavasti nopeuttaa tarkkuuden suuremmin kärsimättä vähentämällä aktiivisten antenniparien määrää.

### 3.2.3 Väliaineen sähköiset ja magneettiset ominaisuudet

Maatutka-antennin lähettämän signaalin etenemisnopeuteen ja heijastumiseen väliaineessa vaikuttavat väliaineen sähköiset ominaisuudet, dielektrisyys, sähkönjohtavuus ja magneettinen susceptibiliteetti (permeabiliteetti). Suomessa materiaalien ja pohjaan magneettisella susceptibiliteetillä ei ole käytännössä merkitystä maatutkasignaalin etenemiseen (SGY 1991; Maijala, 1991). Sähkönjohtavuus taas ei vaikuta juurikaan aallon heijastumiseen, vaan lähinnä sen vaimenemiseen.

Dielektrisyysarvo  $\epsilon_r$  kuvaa aineen kykyä varautua eli polarisoitua ulkoisen sähkökentän vaikutuksesta. Kun ulkoisen sähkökentän vaikutus loppuu, aineen alkuvaraus palautuu. Jos alkutila ei täysin palaudu, polarisaatio on silloin häviöllistä. Tällaisissa tapauksissa dielektrisyysarvoa voidaan tarkastella kompleksisena suurena, jossa reaali-osa kuvaa palautuvaa polarisaatiota ja imaginääriosa tapahtuvia häviöitä (Saarenketo & Maijala, 2004).

Voimakkaasti polarisoituva luonnonmateriaali on vesi. Maamateriaalien dielektrisyysarvo riippuukin suurelta osin vapaan veden määrästä materiaalissa. Taulukossa 3.2 on esitetty eräiden materiaalien dielektrisyysarvoja. Taulukosta voidaan nähdä, että veden dielektrisyysarvo 81 on huomattavasti suurempi kuin kiinteiden aineiden. Kiinteiden aineiden dielektrisyysarvo on tyypillisesti 3–5 niiden ollessa luonnonkuivia. Vesi-pitoisuuden kasvu nostaa arvoja huomattavasti (Saarenketo & Maijala, 2004).

*Taulukko 3.2 Eräiden aineiden dielektrisyysarvoja (Maijala, 1991)*

| Materiaali                      | $\epsilon_r$    |
|---------------------------------|-----------------|
| Ilma                            | 1               |
| Asfaltti                        | 4...7           |
| Betoni (kuiva/kasteltu)         | 8...15          |
| Kalliomurske                    |                 |
| - kosteus 3 %                   | 5,5             |
| - veden kyllästämä              | 10              |
| Savi (kuiva/veden kyllästämä)   | 4 / 8–16        |
| Hiekka (kuiva/veden kyllästämä) | 4–6 / $\leq 25$ |
| Jää                             | 4–8             |
| Vesi                            | 81              |

Väliaineen sähkönjohtokyky eli sähkönjohtavuus kuvaa vapaiden varausten liikkumista väliaineessa. Ulkoinen sähkökenttä siirtää näitä varauksia väliaineessa. Mitä enemmän vapaita varauksia, ioneja ja elektroneja, sitä suurempi on materiaalin sähkönjohtavuus. Väliaine, jolla on suuri sähkönjohtavuus, vaimentaa maatutkasignaalia tehokkaasti, jolloin maatutkasignaalin syvyysulottuvuus pienenee. Esimerkkinä voimakkaasti vaimentavasta materiaalista on savi (Saarenketo & Maijala, 2004).

Sähkönjohtavuuden yksikkö on Siemens/metri [S/m], mikä saadaan jakamalla virta  $I$  jännitteen  $U$  ja mittausvälin pituuden  $l$  tulolla. Usein käytössä on myös ominaisvastus  $\rho$ , mikä on sähkönjohtavuuden käänteisluku. Ominaisvastuksen yksikkö on  $\Omega\text{m}$ .

Kiviaineksen sähkönjohtavuuteen vaikuttavat mm. vesipitoisuus, kiviaineksen huokoisuus, jännitystila, kemialliset epäpuhtaudet (erilaiset mineraalit), rapautumisaste, lämpötila, paine ja kiviaineksen rakenne (ruhjeet, rakoilu) (Peltoniemi, 1988).

Koska raidesepeli tukikerroksessa koostuu itse kivilajin, esimerkiksi graniitin lisäksi myös ilmasta ja vedestä, sen sähkönjohtavuuteen vaikuttaa kaikkien osa-aineiden ominaisuudet. Raidesepelin sähkönjohtavuuteen vaikuttavat osa-aineiden omat sähköiset ominaisuudet, osa-aineiden tilavuudet raidesepelissä ja kivimateriaalin rakeisuus (Clark et al, 2003).

### 3.2.4 Maatutkasignaalin nopeus ja aallonpituus väliaineessa

Maatutka-antennin lähettämä sähkömagneettinen signaali etenee eristeisessä väliaineessa nopeudella  $v$ , joka riippuu dielektrisyysarvosta  $\epsilon_r$  ja magneettisesta susceptibiliteetistä  $\mu_r$  ( $\sim 1$ ) (kaava 3-1) (SGY, 1991; Saarenketo, 2006).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\mu_r \epsilon_r}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3-1)$$

missä  $v$  on aallon etenemisnopeus väliaineessa [m/ns],  $c$  on valon nopeus [m/ns] ja  $\epsilon_r$  on väliaineen dielektrisyys.

Rajapinnan syvyys saadaan laskettua kaavalla (3-2) (Saarenketo, 2006).

$$s = \frac{vt}{2} = \frac{ct}{2\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3-2)$$

missä  $s$  on rajapinnan syvyys [m] ja  $t$  on pulssin kaksinkertainen kulkuaika [ns].

Vastaanotetun signaalin aallonpituuteen vaikuttaa käytettävän antennin lähetystaajuus ja väliaineen dielektrisyys. Aallonpituus voidaan laskea kaavalla (3-3) (Hänninen, 1991).

$$\lambda = \frac{c}{f\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3-3)$$

missä  $\lambda$  on maatutkasignaalin aallonpituus [m] ja  $f$  on käytetyn antennin keskitaajuus [MHz].

Väliaineen dielektrisyys voidaan laskea kaavalla (3-4), kun tiedetään signaalin kulkuaika  $t$  ja rajapinnan syvyys  $s$  sekä valon nopeus  $c$  (Clark et al, 2001).



$$\varepsilon_r = \left( \frac{2ct}{s} \right)^2 \quad (3-4)$$

### 3.3 Maatutkasignaalin eteneminen raideseipelissä

#### 3.3.1 Signaalin eteneminen ja vaimeneminen

Homogeenisessä väliaineessa sähkömagneettisen signaalin vaimeneminen on suoraan verrannollinen väliaineen sähkönjohtavuuteen. Hyvin sähköä johtavissa aineissa (johtavuus  $> 10 \text{ mS/m}$ ) vaimeneminen on merkittävää. Käytetyllä antennitaajuudella on myös merkitystä signaalin vaimenemiseen siten, että mitä korkeampi taajuus, sitä suurempaa on vaimeneminen (ks. taulukko 3.1). Aallon vaimeneminen  $\alpha$  väliaineessa voidaan likimääräisesti laskea kaavalla (3-5) (SGY, 1991; Hänninen, 1992).

$$\alpha \approx 1636,5\sigma \sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}} \approx \frac{1636,5\sigma}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (3-5)$$

missä  $\alpha$  on aallon vaimentuminen väliaineessa [dB/m] ja  $\sigma$  on sähkönjohtavuus [S/m].

Maatutkasignaalin kohdatessa rajapinnan, jossa sähköiset ominaisuudet muuttuvat, osa signaalista läpäisee rajapinnan ja osa heijastuu takaisin optiikan lakien mukaan. Moninkertaiset takaisinheijastumiset ja taittumiset vaimentavat signaalia ja vähentävät näin sen tunkeutumisyyvyyttä. Tunkeutumisyyvyyttä pienentää myös signaalin sirontaa aiheuttavat, etenkin signaalin aallonpituutta suuremmat objektit. Lisäksi signaali vaimenee antennin ja heijastavan rajapinnan etäisyyden funktiona sekä erilaisten lämpöhäviöiden seurauksena (SGY, 1991).

Jokaisella väliaineiden rajapinnalla tapahtuu rajapinnan luonteesta riippuva signaalin jakautuminen heijastuvan ja läpäisevän aallon osiin. Rajapinnan eripuolilla olevien väliaineiden dielektrisyyksien suhteen ollessa noin 1.0, signaali läpäisee rajapinnan, eikä signaalin heijastumista ei juuri tapahdu. Dielektrisyyksien suhteen pienentyessä rajapinnan läpäisevä signaali alkaa vaimentua ja heijastunut signaali voimistua. Dielektrisyyksien suhteen edelleen pienetessä rajapinnalla tapahtuu jossain vaiheessa signaalin täydellinen takaisinheijastuminen (Hänninen, 1991). Tällainen takaisinheijastuminen tapahtuu esimerkiksi metallilevyn pinnasta.

Kuten edellä on tullut selväksi, maatutkasignaalit ovat herkkiä materiaalissa tapahtuville sähköisten ominaisuuksien vaihteluille. Tehtäessä maatutkamittauksia rata-alueilla, joissa rakenteen sähkönjohtokyky on suuri, mittauksen syvyysulottuvuus vähenee. Jos tukikerroksen ja alusrakenteen dielektrisyyksissä on selkeä ero, maatutkasignaalit erottavat näiden välisen rajapinnan helposti. Vastaavasti jos maatutkamittausten perusteella tukikerroksen ja alusrakenteen rajapinta erottuu heikosti, se voi johtua tukikerroksen suuresta sähkönjohtokyvystä, joka vaimentaa signaalia voimakkaasti tai rakennekerrosten samanlaisista sähköisistä ominaisuuksista rajapinnan lähellä (Clark et al, 2003).

Maassa olevien erilaisten objektien pienin mahdollinen syvyys, joka prosessoimattomasta maatulka-aineistosta voidaan havaita pinnasta lukien, on kolmasosa lähetetyn signaalin aallonpituudesta (Clark et al, 2003). Aallonpituuteen taas vaikuttaa kaavan (3) mukaan käytettävän antennin lähetystaajuus ja väliaineen dielektrisyys. Ratarakenteessa olevien objektien erotuskyky ei käytännössä ole ongelma rakenteen ja mittausten luonteista johtuen. Tukikerroksen paksuushan on keskimäärin puoli metriä, eikä maatulka-tekniikkaa käytetä tunnistamaan esineitä tukikerroksen sisältä. Signaalille suurempi ongelma rataympäristössä on tukikerroksesta aiheutuva sironta. Mitä pienempi aallonpituus on (korkeampi antennitaajuus), sitä enemmän signaali siroaa raidesepeleistä. Signaalin sironta vaikeuttaa tulkintaa ja pienentää signaalin tunkeutumis- syvyyttä. Tutkimuksien (Clark et al, 2003) mukaan materiaalissa, jonka keskimääräinen raekoko on 50 mm, käytettävä antennitaajuus saa olla enintään 500 MHz, jos sirontaa halutaan välttää. Antennin lähetystaajuuden vaikutussuunnat ovat siis vastakkaiset sironnan ja erotuskyvyn suhteen sironnan merkityksen ollessa määräävämpi tekijä. Rataympäristössä tehtävissä maatulka-mittauksissa muita ongelmia raidesepeleistä aiheutuvan sironnan ja raidesepelein sähköisistä ominaisuuksista johtuvan signaalin vaimenemisen lisäksi ovat kiskojen, sähkölaitteiden ja ratapölkkyjen, etenkin betoni-ratapölkkyjen, aiheuttamat häiriöt.

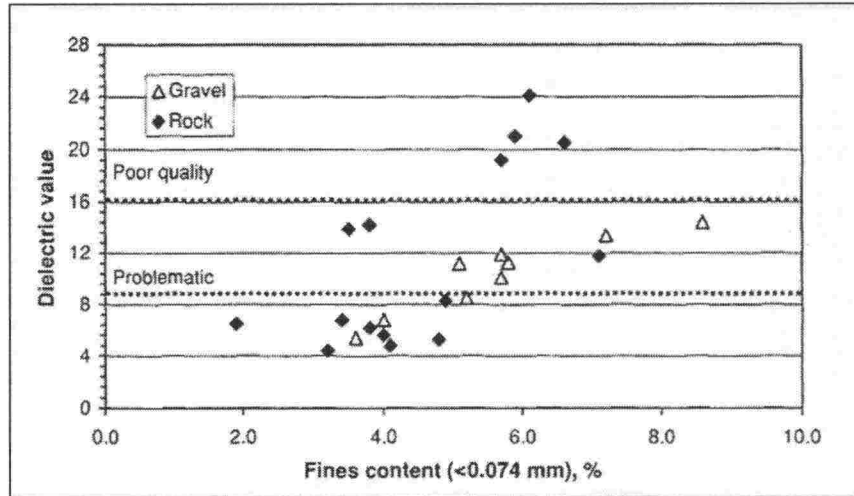
### 3.3.2 Hienoaineksen vaikutus signaalin etenemiseen

#### Hienoaineksen määrä

Eri hienoainespitoisuuden omaavien tukikerrosmateriaalien dielektrisyysarvoja on selvitetty eri tutkimuksissa (Clark et al, 2001; Sussmann, 2002). Tutkimuksissa hienoainespitoisuuden havaittiin kasvattavan materiaalin dielektrisyysarvoa, joka taas vaikuttaa oleellisesti maatulka-signaalin nopeuteen ja heijastumiseen rajapinnoilla (vrt. luku 3.3.1). Lisäksi hienoaineksen on havaittu vaimentavan maatulka-signaalin taajuus-sisällön korkeita taajuuksia (vrt. luku 4.2.5) (Clark et al, 2004).

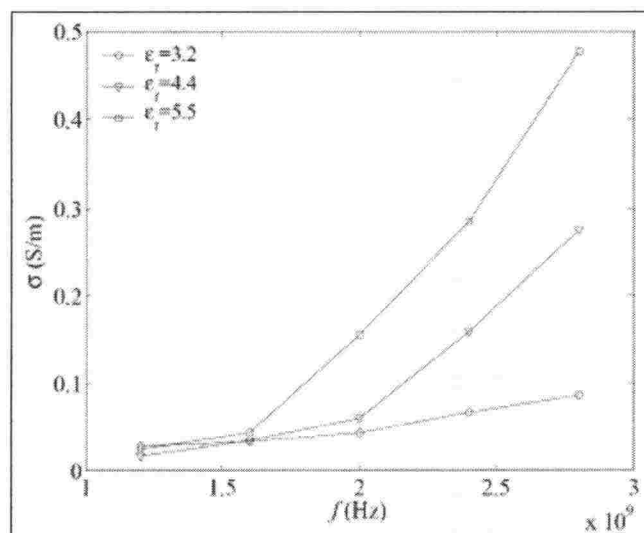
Saarenketo et al. (2002) ovat selvittäneet Tube Suction -testiä käyttämällä murskatun kalliokiviaineksen ja murskatun soran hienoainespitoisuuden vaikutusta dielektrisyyteen. Kuvasta 3.6 voidaan todeta, että hienoainespitoisuuden kasvaessa 5 %:iin materiaalien dielektrisyysarvot ovat materiaalin ongelmalliseksi luokittelevaa raja-arvoa suurempia ( $\epsilon_r > 9$ ). Huonolaatuisilla kalliomurskenäytteillä tämä raja-arvo voidaan saavuttaa 4 % hienoainesmäärällä. Kalliomurskeiden dielektrisyysarvo kohoaa nopeasti hienoainespitoisuuden kasvaessa. Esimerkiksi 6–7 % hienoainesmäärällä dielektrisyys-arvo voi olla jo yli 20.





Kuva 3.6 Hienoainespitoisuuden ja dielektrisyysien suhde sora- ja kalliomurskeilla (Saarenketo et al, 2002).

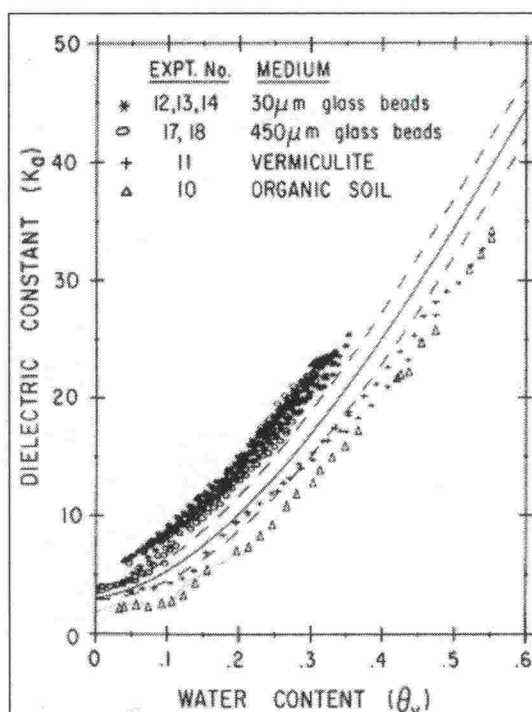
Kuvassa 3.7 on esitetty erilaatuisten materiaalien sähkönjohtavuuden riippuvuutta signaalin lähetystaajuudesta. Kuvasta voidaan huomata, että materiaalien sähkönjohtavuus kasvaa voimakkaasti noin 1600 MHz jälkeen. Sähkönjohtavuuden kasvu riippuu oleellisesti myös materiaalin dielektrisyysarvosta (Lambot et al, 2004). Erot sähkönjohtavuuksien arvoissa ovat suuret verrattaessa sähkönjohtavuuksia dielektrisyysien arvoilla 3,2 ja 5,5, mitkä vastaavat keskimäärin hyvälaatuisen ja hienontuneen raidesepelin arvoja (vrt. Clark et al, 2001). Tuloksesta voidaan päätellä, että mitattaessa maatumalla erilaatuisia kiviaineksia maatumkasignaalin korkeat taajuudet (1500–2000 MHz) vaimentuvat voimakkaammin hienontuneessa materiaalissa johtuen sen suuremmasta sähkönjohtavuudesta (vrt. luku 3.3.1, kaava 3–5). Tällöin olisi mahdollista tunnistaa hienontuneisuudeltaan erilaisia materiaaleja vertailemalla maatumkasignaalin taajuussisällön korkeita taajuuksia.



Kuva 3.7 Sähkönjohtavuuden riippuvuus lähetystaajuudesta ja dielektrisydestä (Lambot et al, 2004).

## Hienoaineksen kosteus

Kiviaineksen sähköiset ominaisuudet määräytyvät käytännössä kiviaineksen rakeisuuden ja kiviaineksen sisältämän veden mukaan. Raidesepelin hienorakeinen aines mahdollistaa kapillaarisen veden ja adsorbtioveden esiintymisen ja suuremman vesipitoisuuden. Kuvassa 3.8 on esitetty dielektrisyiden ja väliaineen vesipitoisuuden välistä riippuvuutta (Topp et al, 1980). Kuvaajan pieni kolmio kuvaa dielektrisyiden käyttäytymistä vesipitoisuuden kasvaessa orgaanisessa aineksessa.



Kuva 3.8 Dielektrisyiden ja väliaineen tilavuusvesipitoisuuden välinen riippuvuus erityyppisillä materiaaleilla (Topp et al, 1980).

Tukikerrosmateriaalin kosteuspitoisuus on siis varsin riippuvainen aineksessa olevasta hienoainemäärästä. Hienoaineksen kykyyn sitoa vettä vaikuttaa mm. sen mineralogia, hienoaineksen partikkelikoot, huokoskokojakauma, ominaispinta-ala, veden adsorptio ja humuspitoisuus.

## Hienoaineksen mineralogia

Raidesepelissä oleva hienoaines on Suomessa tutkimuksien (Nurmikolu, 2006) mukaan suurimmaksi osaksi sepelin mekaanisesta hajoamisesta syntynyttä ainesta. Tällöin voidaan olettaa hienoaineksen kivilajin ja mineraalikoostumuksen vastaavan suhteellisen hyvin itse raidesepelin koostumusta, joskin heikommalla mineraalilla jossain määrin rikastuvat hienoainekseen.

Maatutkasignaalin vaimentumiseen ja heijastumiseen vaikuttavat oleellisesti kiviaineksen sähkönjohtavuus ja dielektrisyys. Jotta raidesepelin sähkönjohtavuus olisi mahdollisimman vähäistä, tulee sepelin raaka-aineen sisältää vain vähän malmineraaleja sekä grafiittia, joiden määrää onkin rajoitettu (ks. luku 2.2.4).



Esimerkiksi Suomessa raidesepelikivilajina käytettävä graniitti on pääosin kali-  
maasälpää, plagioklaasia, kvartsia ja biotiittia ja mahdollisesti sarvivälkettä sisältävä  
syväkivi. Esimerkkinä taulukossa 3.3 on esitetty kivilajien dielektrisyysarvoja. Arvot  
vaihtelevat jonkin verran, mutta graniitin voidaan kuitenkin todeta omaavan keski-  
määrin lievästi pienemmän dielektrisyysarvon verrattuna useisiin muihin kivilajeihin.  
Alhaisilla kosteuspitoisuuksilla graniittisilla kivillä voi olla taulukon graniitille  
ilmoittamaa arvoa pienempiäkin dielektrisyysarvoja. Taulukon mukaan suurimmillaan  
graniitin dielektrisyysarvo on 9,0.

*Taulukko 3.3 Eri kivilajien dielektrisyysarvoja (Maijala, 1991).*

| Kivilaji                  | Dielektrisyys<br>$\epsilon_r$ |
|---------------------------|-------------------------------|
| <i>Metamorfiset kivet</i> |                               |
| Amfiboliitti              | 7,9–8,9                       |
| Gneissi                   | 8,0–15                        |
| Kvartsiitti               | 4,3–7,0                       |
| <i>Sedimenttikivet</i>    |                               |
| Dolomiitti                | 7,8–8,6                       |
| Kvartsi                   | 4,7–5,1                       |
| Kalkkikivi                | 7,3–12,0                      |
| <i>Syväkivet</i>          |                               |
| Graniitti                 | 4,5–9,0                       |
| Dioriitti                 | 5,9–11,5                      |
| Gabro                     | 8,8–13                        |
| Diabaasi                  | 9,0–13                        |

Taulukoissa 3.4 ja 3.5 on esitetty eri kivilajien ja kivimineraalien sähkönjohtavuus-  
arvoja. Kivilajeista pienimmät sähkönjohtavuudet ovat syväkivillä, kuten gabrolla ja  
graniitilla sekä metamorfisilla kivillä, gneissillä ja kvartsiitilla (taulukko 3.4).  
Kivimineraalien suurimmat sähkönjohtavuudet ovat grafiitilla ja erilaisilla kiisuilla  
(taulukko 3.5). Tästä johtuen on luontevaa rajoittaa grafiitin ja malmimineraalien  
määrää raidesepelin raaka-aineena sähkönjohtavuuden rajoittamisen kannalta (vrt. luku  
2.2.4). Taulukkojen arvoista voidaan todeta, että tyypillinen suomalainen raidesepeli  
antaa mineralogialtaan hyvät edellytykset tutkimustensa onnistumiselle alhaisen  
sähkönjohtavuuden vuoksi, jolloin maatutkasignaalin vaimeneminen on mahdollisimman  
vähäistä (vrt. kaava 3–5).

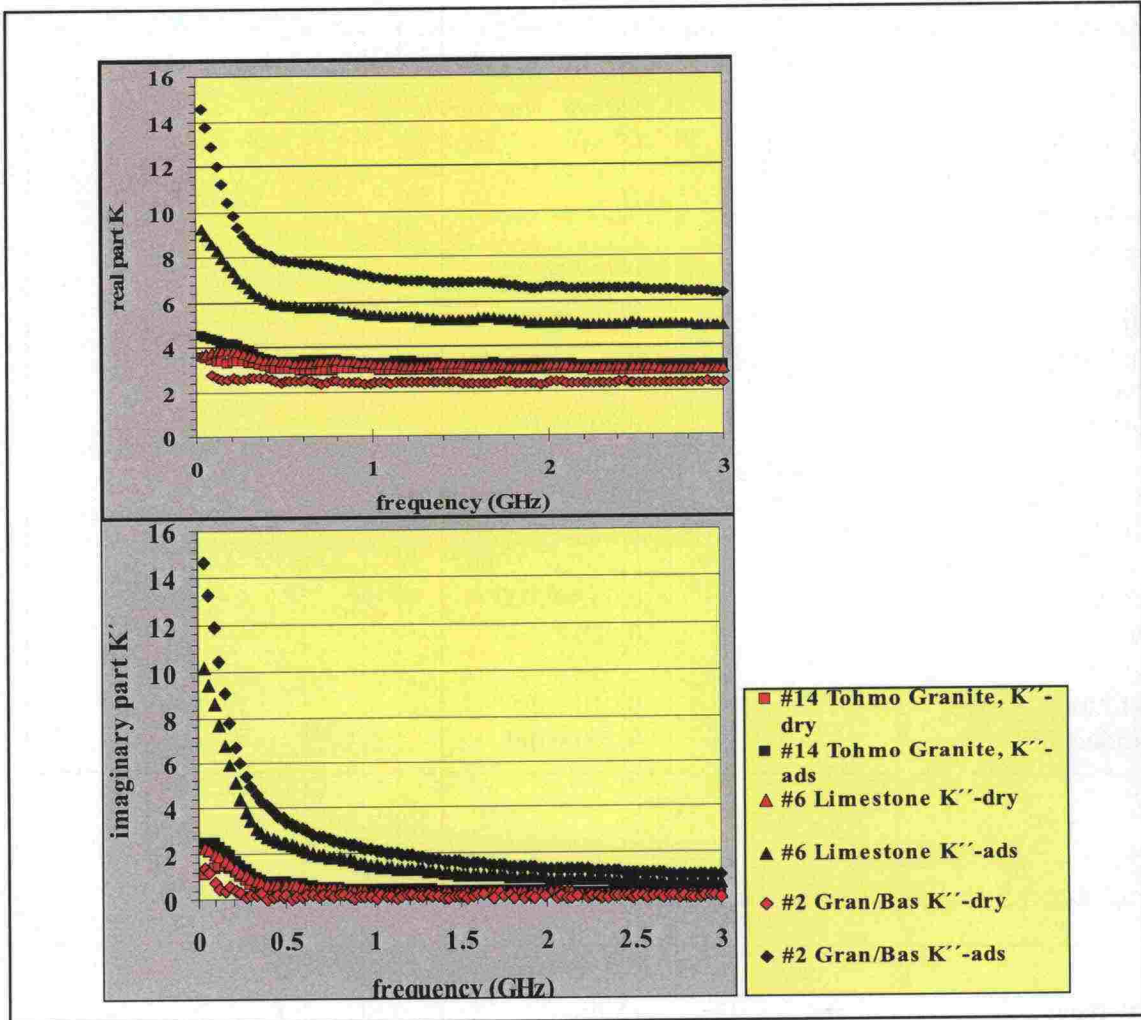
Taulukko 3.4 Eräiden maa- ja kivilajien sähkönjohtavuuksia (Peltoniemi, 1988).

| Materiaali   | Sähkönjohtavuus $\sigma$<br>[S/m] |
|--|-----------------------------------|
| sora ja karkea hiekka  | 0,0005–0,001                      |
| hiekk  | 0,001–0,002                       |
| siltti   | 0,005–0,012                       |
| savi   | 0,015–0,030                       |
| moreeni  | 0,002–0,005                       |
| turve  | 0,003–0,010                       |
| muta, lieju  | 0,007–0,012                       |
| gabro  | 0,00003–0,0001                    |
| graniitti, kalkkikivi, gneissi,<br>kiilleliuske, kvartsiitti | 0,00006–0,0002                    |
| serpentiiniitti  | 0,002–0,020                       |
| savikivi   | 0,020–0,050                       |
| grafiittinen gneissi   | 0,010–10                          |
| sulfidimalmit  | 0,100 - 100                       |

Taulukko 3.5 Eräiden kivimineraalien sähkönjohtavuuksia (Peltoniemi, 1988).

| Materiaali  | Sähkönjohtavuus $\sigma$<br>[S/m] | Tyypillinen arvo |
|-------------|-----------------------------------|------------------|
| biotiitti   | $10^{-2}$ – $10^{-6}$             |                  |
| kvartsi     | $10^{-10}$ – $10^{-14}$           |                  |
| kiille      | $10^{-3}$ – $10^{-14}$            | $10^{-5}$        |
| sinkkivälke | $10^{-4}$ – $10^{-4}$             | 1                |
| hematiitti  | $10^{-4}$ – $10^{-4}$             | 1                |
| magnetiitti | $10^{-4}$ – $10^{-5}$             | $10^2$           |
| rikkikiisu  | $1$ – $10^5$                      | $5 \times 10^3$  |
| kuparikiisu | $10$ – $10^4$                     | $10^4$           |
| grafiitti   | $10^2$ – $10^6$                   | $10^5$           |

Saarenketo & Scullion (1995) selvittivät verkkoanalysointorilla (Surface Network Analyzer, SNA) taajuusvälillä 30 MHz – 3 GHz erityyppisistä kiviaineksista lähtöisin olevien hienoainesten dispersio-ominaisuuksia (kuva 3.9). Dispersio kuvaa materiaalin dielektrisyyden taajuusriippuvuutta. Kuvassa on esitetty materiaalien dielektrisyyden reaali- ja imaginääriosat (vrt. luku 3.2.3) hienoainesten ollessa uunikuivattuja ja vedellä adsorboituneita. Kuivien näytteiden dielektrisyydet olivat lähes vakiot koko taajuusalueella. Suurin dielektrisyyden taajuusriippuvuus oli matalissa taajuuksissa (0–500 MHz) ennalta huonolaatuisiksi tiedetyissä vedellä adsorboituneissa materiaaleissa, kun taas laadultaan ja mineralogialtaan hyväksi materiaaliksi tiedetyn graniittisen kalliomurskeen (Tohmo) hienoaineksella taajuusriippuvuutta ei juurikaan ollut havaittavissa.



Kuva 3.9 Kolmesta kiviaineksesta otetun hienoaineksen reaali- (ylempi kaavio) ja imaginääri- (alempi kaavio) dielektrisen dispersio. Näytteet ovat uunikuivattuja ja vedellä adsorboituneita (Saarenketo & Scullion, 1995).

Maatutkasignaalin vaimenemiseen ja sen taajuussisältöön liittyy oleellisesti luvussa 3.3.2 esitetty korkeilla taajuuksilla tapahtuva sähkönjohtavuuden kasvu, mutta myös edellä esitetty dielektrinen dispersio eli taajuusriippuvuus.



## 4 MAATUTKAN HYÖDYNTÄMINEN RATARAKENTEEN TUTKIMISESSA

### 4.1 Mittausaineiston käsittely

#### 4.1.1 Maatutkalaitteistot ja -ohjelmistot

Rata- ja tiemittauksissa voidaan käyttää maatutkakomponenttien rinnalla GPS-laitteistoa ja videota. Maatutka-aineisto linkitetään GPS-paikannuslaitteistoon mittausten sijaintitiedon saamiseksi. Maatutkamittausta ja eri laitteistojen käyttöä ohjataan tietokoneella. Kuvassa 4.1 on esitetty tyypillinen ratamittauksissa käytetty laitteistokokoonpano ja niiden sijoittelu huoltoveturissa.



Kuva 4.1 Tyypillinen ratatutkimuksissa käytetty laitteistokokoonpano.

Saarenkedon ja Scullionin (2000) mukaan maatutkatekniikkaan liittyvät ohjelmistot voidaan jaotella tehtävien mukaan eri luokkiin, joita ovat:

- maatutka-aineiston keräysohjelmistot
- aineiston prosessointiohjelmistot
- aineiston tulkintaan ja visualisointiin liittyvät ohjelmistot
- suunnitteluohjelmistot

Maatutka-aineistojen tulkintaan ja visualisointiin liittyvien ohjelmistojen avulla voidaan tunnistaa aineistosta rakennekerrosten rajapintaheijasteet ja yksittäiset objektit, kuten rummut tai kaapelit sekä muuttaa maatutkatulkintojen aikataso syvyystasoksi. Tulkintaohjelmistoissa on automaattisia ja puoliautomaattisia tulkintatyökaluja.

Automaattisten tulkintatyökalujen algoritmien luotettavuus ei aina ole paras mahdollinen johtuen maarakenteiden luonteesta, koska rakennekerrosten vaihtelut sivu- ja pituussuunnassa sekä erilaiset epäjatkuvuudet ovat yleisiä. Parempaan ja tarkempaan lopputulokseen voi usein päästä käyttämällä ”puoliautomaattisia” tulkintatyökaluja, joissa kokeneet tulkitsijat referenssitietojen, esimerkiksi kairaustietojen, avulla tulkitsevat rakenteet (Saarenketo & Scullion, 2000).



Uusimmat maatumkateknikkaan liittyvät ohjelmistot ovat erilaisia analyysi- ja suunnitteluohjelmia. Näiden ohjelmien avulla voidaan laskea erilaisia parametreja, esimerkiksi rakennekerroksien paksuuksia, jotka voidaan antaa numeerisessa muodossa tai erilaisina viivaesityksinä rakenteen pituusprofiilissa (Saarenketo & Scullion, 2000).

#### 4.1.2 Mittausaineiston esikäsittely

Mittausaineiston esikäsittelyllä tarkoitetaan tutka-aineiston editointia ja eri tavoilla hankittujen tietojen yhdistämistä maatumka-aineistoon. Tutka-aineiston editointi tarkoittaa sellaisia operaatioita, jotka eivät muuta maatumkadatan varsinaista tietosisältöä. Tällaisia editointioperaatioita ovat esimerkiksi matkakoordinaattien sitominen ja tiedostojen mittaus suunnan kääntäminen (Saarenketo & Majjala, 2004; Majjala, 2000).

Matkakoordinaattien sitominen tarkoittaa mittauspisteiden sijainnin määrittystä alkupisteen sijainnin ja tietyn vakiomittakaavan avulla. Näin tehdään rata- ja tiemittauksissa, kun varsinaisilla pintakoordinaateilla ei ole suurta merkitystä. Lisäksi on huomioitavaa, että mittaukset skaalataan aina rata- tai tierekisteripituuteen tulosten tarkkuuden parantamiseksi (Saarenketo & Majjala, 2004). Esimerkiksi rautateillä kilometripylväiden väli ei välttämättä ole aina tasan kilometriä johtuen esimerkiksi vuosikymmenien aikana tehdyistä rataoikaisista.

Tiedostojen mittaus suunnan kääntäminen tehdään, jos tutkamittaukset on tehty esimerkiksi kaksiraiteisella rataosuudella molemmille raiteille. Tällöin tiedostojen mittaus suunnan kääntämisoperaatiolla käännetään rinnakkaiset mittauslinjat samansuuntaisiksi. Mittausten paikannus voidaan tarkistaa lopuksi esimerkiksi siltojen tai rumpujen sijaintien avulla (Saarenketo & Majjala, 2004; Majjala, 2000).

Ennen tulkinnan aloittamista ratamittauksissa mittausaineistosta määritetään vertikaalisuunnan nollassa kiskoja alapinnan tasolle. Lisäksi aineistosta poistetaan ulkoiset, eli kiskoja ja muiden metallisten esineiden aiheuttamat häiriöt ”taustan poisto” suodatusoperaatiolla. Tämän jälkeen aineistoon voidaan lisätä mahdollisia referenssitietoja, esimerkiksi kairaus tietoja ja radan geometriatietoja (Saarenketo & Majjala, 2004).

#### 4.1.3 Mittausaineiston tulkinta

Maatumka-aineisto edellyttää tulkintaa, jotta siitä voitaisiin analysoida rakenteiden paksuuksia, vauriokohtia ja vaurioiden laatua. Maatumka-aineiston tulkinta perustuukin rajapintoja seurantaan ja näiden rajapintoja ominaisuuksien laskentaan.

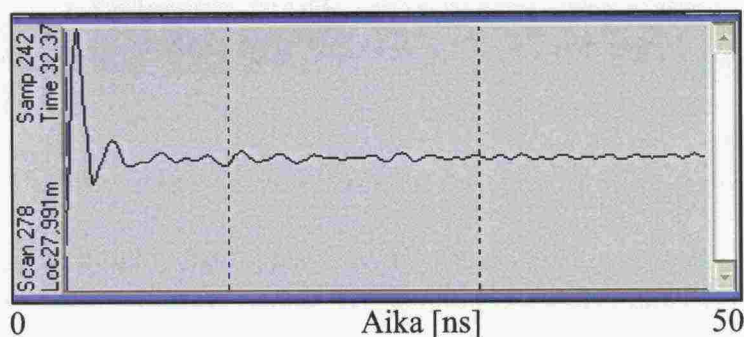
Prosessoinnin jälkeen maatumka-aineistosta tulkitaan rakennekerrosten rajapinnat, kuten esimerkiksi tukikerroksen alapinta, josta voidaan määrittää tukikerroksen kerrospaksuus. Tulkinnalle voidaan antaa neljä eri vaihetta: (Silvast & Nurmikolu, 2005).

1. vaihe Maatumkaprofiili tulostetaan näytölle ja aineistosta poistetaan ulkoiset häiriöt
2. vaihe Mahdolliset referenssitiedot, kuten kairaukset tulostetaan prosessoidun maatumkaprofiilin kanssa samaan näkymään.

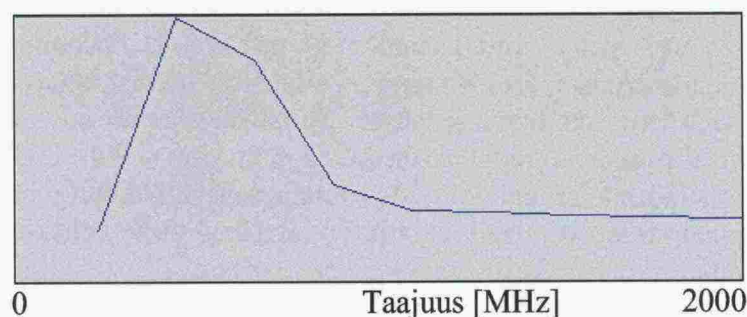
3. vaihe Rakennekerroksien aiheuttamat heijasteet tulkitaan näkymään viivalla. Kerrokset nimetään ja niille annetaan materiaalille ominainen tai mahdollisesti kairauksista määritetty dielektrisyysarvo.
4. vaihe Tulkinnoille tehdään aika-syvyysmuunnos ja lasketaan kerrosten todelliset paksuudet. Viivatulkinnat tulostetaan kairausten kanssa maatutka-aineiston alapuolelle.

#### 4.1.4 Maatutkasignaalin taajuussisällön analysointi

Lambot et al (2004) havaitsivat, että materiaalien sähkönjohtavuudet alkoivat kasvaa korkeilla taajuuksilla ( $f > 1500$  MHz). Kasvu oli sitä isompaa, mitä suurempi materiaalin dielektrisyysarvo oli (ks. kuva 3.7). Suuremman dielektrisyysarvon omaava materiaali vaimentaa tällöin maatutkasignaalin korkeita taajuuksia enemmän. Jotta maatutkasignaalien taajuussisältöä voidaan tutkia, täytyy signaalin aikatason mittaukset muuntaa taajuustasoon. Tämä muutos tehdään Fourier-muunnoksella (vrt. kuva 3.4) Fourier-muunnos muuttaa aikatasossa olevan signaalin taajuustasoon. Fourier-muunnettu signaali esitetään yleensä taajuusspektrinä, josta voidaan analysoida signaalin taajuussisältöä ja sen vaimenemisominaisuuksia. Kuvassa 4.2a maatutkasignaali on esitetty aikatasossa ja kuvassa 4.2b signaali on muutettu Fourier-muunnoksella taajuustasoon.



Kuva 4.2a Maatutkasignaali aikatasossa 0–50 ns.



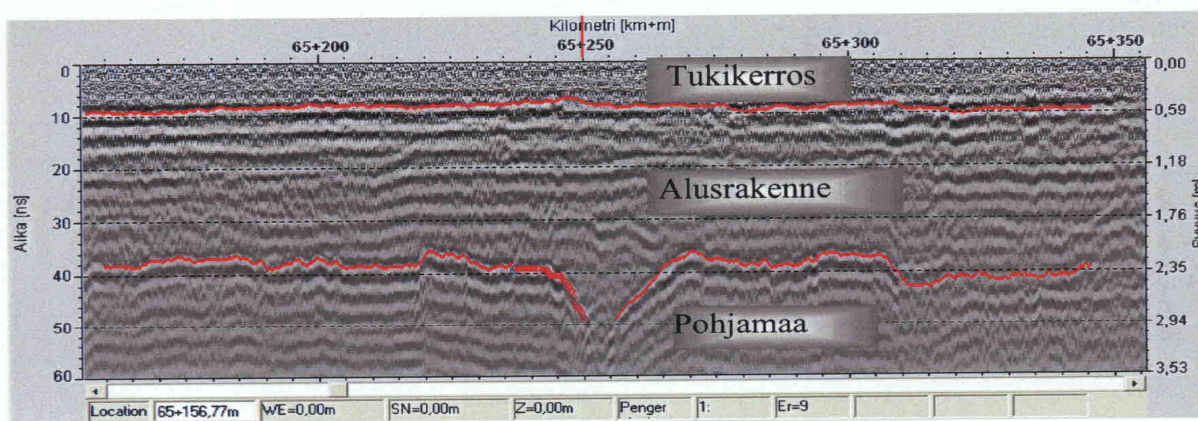
Kuva 4.2b Maatutkasignaali taajuustasossa (taajuusspektri).



## 4.2 Käyttökohteet

### 4.2.1 Rakenteen kerrosrajat ja -paksuudet

Maatutkatekniikkaa on käytetty laajasti radan rakennekerrosten rajapintojen sijaintien, kerrospaksuuksien sekä kallionpinnan paikantamisessa jatkuvana mittauksena radan pituussuunnassa. Uusilla menetelmillä, kuten 3D-maatutkatekniikalla, voidaan selvittää myös rakennekerrosten poikittaiset vaihtelut. Kuvassa 4.3 on esimerkki maatutka-profiilista, johon on tehty kerrosrajatulkinnot. Lisäksi profiiliin voidaan lisätä mahdollisista kairauksista saatuja referenssitietoja.



Kuva 4.3 Maatutkaprofiili, johon on tulkittu rakenteen kerrosrajat

Maatutkaluotausta voidaan hyödyntää myös laadunvalvontamittauksissa. Jatkuvan maatutkaprofiilin avulla voidaan helposti tarkistaa rakenteen ja rakennekerrosten suunnitelmien paikkansapitävyys esimerkiksi uusilla rataosilla tai paikallisilla korjauskohteilla.

Tarkka rakennekerrosten, esimerkiksi tukikerroksen paksuustulkinta vaatii luotettavia tietoja signaalin nopeudesta ratarakenteessa, mikä taas riippuu tukikerroksen fysikaalisista ominaisuuksista. Nopeuden arvioinnissa onkin tehtävä olettamuksia, joiden mukaan tukikerros on homogeeninen. Tällainen tilanne on kuitenkin harvoin oikea, koska signaalin nopeus tukikerroksessa riippuu aina siellä olevasta hienoainemäärästä, vesipitoisuudesta tai mahdollisista routalinsseistä. Näiden johdosta tulkitun ja todellisen rajapinnan virhemarginaali on noin 10 %. Tämä virhe voidaan pienentää noin 5 %:iin mittaamalla talviaikaan rakenteiden ollessa jäässä, jolloin rakenteen ominaisuudet ovat suhteellisen homogeeniset (Silvast, et al, 2006).

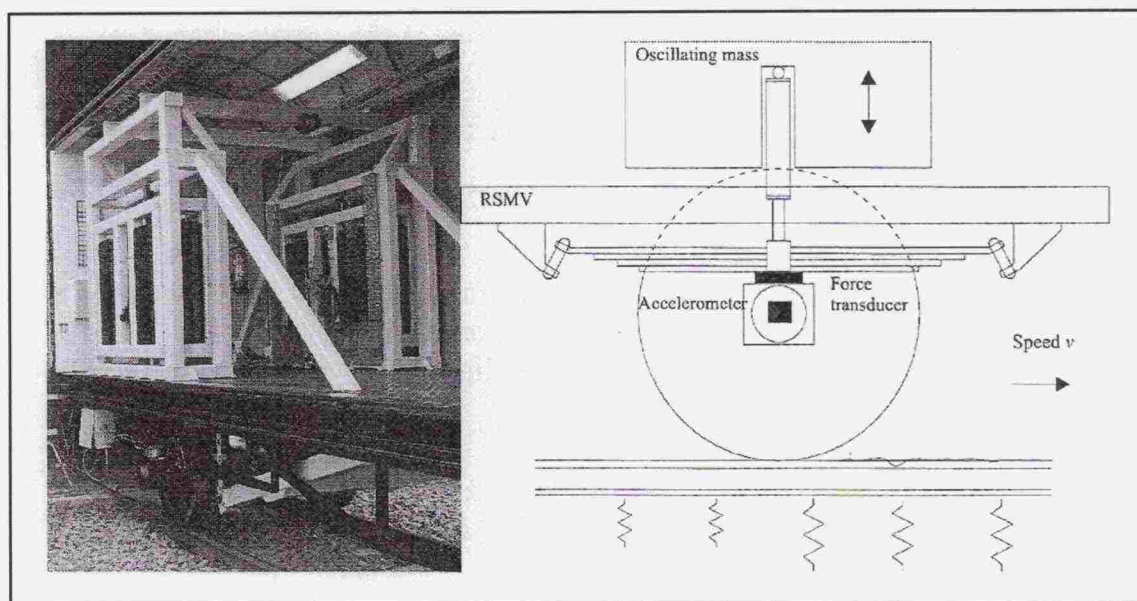
Maatutkapulssin nopeutta on tutkittu erityyppisissä kiviaineksissa. Signaalin nopeuden tukikerrossepelissä on arvioitu olevan 13 cm/ns (väliaineen  $\epsilon_r$  noin 5,3) (Carpenter et al, 2003) ja 14 cm/ns (väliaineen  $\epsilon_r$  noin 4,6) (Hugenschmidt, 1998). Nopeuksia on sovellettu maatutkatulkinnoissa, ja vastaavuudet todellisiin kerrospaksuuksiin ovat olleet hyviä (Carpenter et al. 2003). Signaalin nopeus voi kuitenkin tukikerroksessa muuttua paikallisesti paljonkin johtuen materiaalin laadusta, kuten hienoaineksen määrästä tai vesipitoisuudesta, jotka taas johtavat tulkinnan epätarkkuuteen.



#### 4.2.2 Radan ongelmakohteiden syiden tarkastelu

Maatutkaluotausta on käytetty rataympäristössä monissa erilaisissa kohteissa selvittämään ja paikantamaan radassa olevia ongelmia. Maatutkaa on käytetty mm. kantavuudeltaan heikkojen ja epästabiilien alueiden tunnistamiseen, routaeristeiden paikantamiseen, riittämättömien rakennekerrospaksuuksien tunnistamiseen ja paikantamiseen, radan parannustoimenpiteiden suunnitteluun sekä ratageometria-poikkeamien syiden selvittämiseen (Smekal et al, 2006; Sussmann et al, 2001).

Ruotsissa radan kantavuus- ja jäykkyysarvojen tarkasteluissa maatutkamittaukset on yhdistetty kantavuusmittauksiin kehitettyyn mittausvaunuun, (Rolling Stiffness Measurement Vehicle, RSMV), joka on esitetty kuvassa 4.4. Mittausvaunussa mittausakselin yläpuolelle on asennettu pystysuorasti liikkuvat tärypainot. Vaunun liikkuessa tärypainoista aikaansaatujen kiihtyvyyksien avulla mitataan radan kantavuutta. (Smekal et al, 2006).



Kuva 4.4 Radan jäykkyyttä mittaava mittausvaunu (RSMV) (Smekal et al, 2006).

Maatutkatekniikalla on tutkittu (Hyslip et al, 2003; Olhoeft & Selig 2002) ratapenkereen epästabiilisuudesta ja pohjamaan muodonmuutoksista aiheutuvia ongelmia. Tutkimuksissa tehtiin maatutkamittauksia radan keskilinjalta sekä raiteen molemmilta reunoilta. Näistä saatuja maatutkaprofiileja vertailtiin keskenään. Aineistojen suuret eroavaisuudet rajapinnoissa kertoivat rakenteen epästabiilisuudesta ja pystysuuntaisista painumaeroista radan poikkisuunnassa.

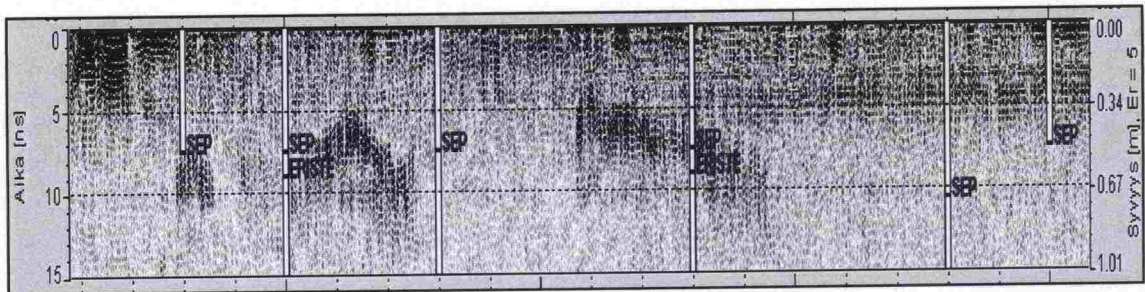
Radan puutteellinen kuivatus liittyy olennaisesti radan suorituskykyyn. Tutkimukset (Smekal et al, 2006) ovat osoittaneet, että ojien ja rumpujen liittymiskohdat yhdessä puutteellisen kuivatuksen kanssa ovat usein ongelmakohtia ratarakenteelle. Tällaisiin kohtiin voi muodostua vesipatoumia, joita on paikannettu maatutkalla. Tutkimuksen mukaan rakenteessa oleva vesi johtuu usein pohjamaan muodonmuutoksista ja puutteellisesta kuivattuksesta.



Lisäksi maatumkatekniikan avulla on kehitelty erilaisia indeksilukuja, jotka kuvaavat alusrakenteen laatua ja rakennekerrosten paksuusvaihteluita (Hyslip et al, 2003)

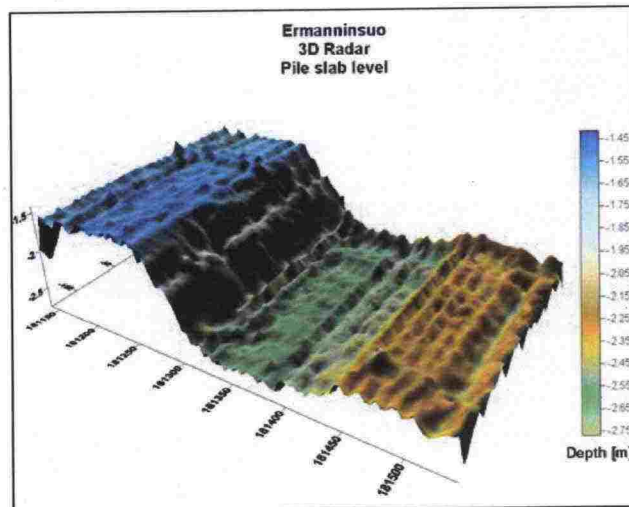
#### 4.2.3 Erityiskohteiden mittaukset

Rataympäristössä maatumkamittauksilla on pyritty paikantamaan radassa olevia erityiskohteita ja selvittämään kohteiden mahdollisia vaurioita. Maatumkalla voidaan paikantaa esimerkiksi rumpuja, kaapeleita, routaeristeitä ja paalulaattoja. Esimerkkikuvassa 4.5 näkyy tummina heijasteina maatumkalla paikannetut routaeristelevyt. Referenssikairauksilla on saatu selville eristelevyjen sijaintisyvyys, mutta maatumkan avulla pystytään helposti paikantamaan myös niiden sijainnit radan pituussuunnassa.



Kuva 4.5 Maatumkalla paikannetut routaeristeet (Silvast et al, 2006).

Moniantennitekniikalla on selvitetty (Silvast & Nurmikolu, 2005) myös paalulaattojen asemaa ja mahdollisia vaurioita. Mittaustuloksista on luotu mahdollisista vaurioista ja rakenteista 3-ulotteinen malli (Kuva 4.6). Mallin avulla on voitu tutkia laatan mahdollisia vaurioita ja sijaintipoikkeamia.



Kuva 4.6 Maatumka-aineistosta koostettu 3-ulotteinen malli paalulaatasta (Silvast et al, 2007).

#### 4.2.4 Pohjamaan routivuuden arviointi

Radan rakennekerrosten alla oleva routiva pohjamaa saattaa aiheuttaa ongelmia radan toimintakyvylle. Roudasta aiheutuvia ongelmia torjutaan helpoiten ratarakenteeseen asennettavien routaeristeiden avulla. Pahimmillaan tilanne voi johtaa siihen, että routivilla rataosuuksilla joudutaan pudottamaan liikennöintinopeutta roudasta aiheutuvien ongelmien takia.

Suomessa maatutkaukseen perustuvassa routatutkimuksissa on testattu erilaisia antenneja ja lähetystaajuuksia routivan pohjamaan tunnistamisessa. Routivan pohjamaan hienoaines ja siten korkeampi vesipitoisuus vaimentavat maatutkasignaalin korkeita taajuuksia, jonka tiedon perusteella pohjamaan laatua ja routivuutta voidaan luokitella (Saarenketo et al, 2003).

#### 4.2.5 Tukikerroksen laadun tutkimus

Maatutkatekniikkaa on käytetty melko laajasti erilaisissa menetelmissä tukikerroksen laadun ja sen ongelmakohtien paikantamiseen. Näytteenottomenetelmien rinnalle on haettu maatutkatekniikkaan perustuvaa tukikerroksen laadun arviointimenetelmää, jolloin näytteenoton roolia olisi mahdollista pienentää tulevaisuudessa. Maatutkatekniikan etuna olisi sen nopeus ja kattavuus. Lisäksi maatutkatekniikalla on mahdollista saada jatkuvaa tietoa tukikerroksen laadusta niin raiteen pituus- kuin poikkisuunnassa. Mittaustapahtuman nopeus mahdollistaa myös kustannussäästöjä verrattuna näytteenottomenetelmiin (Jack & Jackson, 1999).

Tukikerroksen laadusta on kehitelty maatutkaustuloksiin perustuvia indeksilukuja. Raskaasti kuormitetuilla rataosuuksilla voi kiskon alapuolella tukikerroksen laatu heikentyä selvästi liikennekuormasta ja -tärinästä johtuen, jolloin voi muodostua ns. sepelitaskuja kiskon alapuolelle alusrakenteen ja pohjamaan rajapintaan. Tutkimuksissa (Hyslip et al, 2003) on kehitetty sepelitaskuindeksi (Ballast Pocket Index) ilmaisemaan tällaisen sepelitaskun paikan. Tutkimuksissa saatu indeksiluku korreloi hyvin radan geometriapoikkeamien kanssa.

Hyvälaatuinen raidesepeli sisältää runsaasti tyhjätillaa karkeiden rakeiden muodostaessa raidesepelin rungon. Sepelin hienontuessa hienorakeisemmat rakeet pienentävät sepelin tyhjätillan määrää (vrt. kuva 2.3). Roberts et al, (2006) selvittivät tukikerroksen laatua tutkimalla maatutkasignaalin sirontaa erilaatuisissa tukikerrosateriaaleissa. Tutkimuksen mukaan paljon tyhjätillaa omaavassa materiaalissa signaalin sironta tukikerroksen ja alusrakenteen rajapinnalla on huomattavasti voimakkaampaa kuin materiaalissa, missä tyhjätillaa on vähän.

Testiolosuhteissa on tutkittu tukikerrosateriaalin sähköisiä ominaisuuksia erilaisissa vesipitoisuuksissa ja hienoainespitoisuuksissa (Clark et al, 2001; Sussmann et al, 2002). Tutkimuksissa käytettiin puhtaana tukikerrosateriaalina uutta, puhdasta materiaalia ja hienontuneena materiaalina huonon kunnon takia radasta poistettua kiviainesta. Materiaaleille määritettiin dielektrisyysarvot niiden ollessa kuivia, kosteita (vesipitoisuus 5 %) ja vedellä kyllästettyjä. Taulukossa 4.1 on esitetty tutkimuksista saadut dielektrisyysarvot.



Taulukko 4.1 Erilaatuisten sepelien dielektrisyysarvoja.

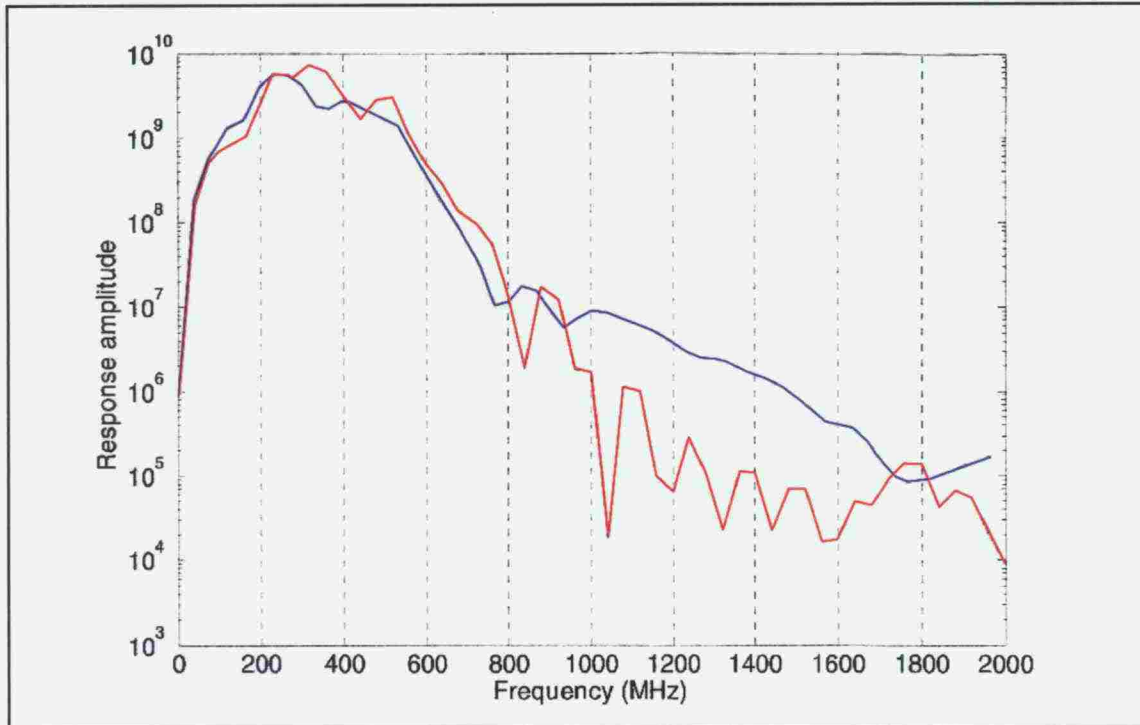
| Materiaali                  | Dielektrisyys $\epsilon_r$<br>(Clark 2001) | Dielektrisyys $\epsilon_r$<br>(Sussmann<br>2002) |
|-----------------------------|--|--|
| <b>Hyvälaatuinen sepeli</b> |  |  |
| Kuiva                       | 3,0  | 3,6  |
| Märkä                       | 3,5  | 4  |
| Vedellä kyllästetty         | 26,9                                       | -  |
| <b>Hienontunut sepeli</b>   |  |  |
| Kuiva                       | 4,3  | 3,7  |
| Märkä                       | 7,8  | 5,1  |
| Vedellä kyllästetty         | 38,5                                       | -  |

Taulukosta nähdään, että hienontuneen tukikerrosmateriaalin dielektrisyysarvot ovat suurempia kuin vastaavat hyvälaatuisen materiaalin arvot. Lisäksi ominaista on dielektrisyiden suuret arvot täysin vedellä kyllästyneiden materiaalien kohdalla. Tuloksissa on kuitenkin huomattavia eroja. Esimerkiksi Sussmannin kuivien materiaalien dielektrisyysarvot ovat lähes yhtä suuret, kun vastaavasti Clarkin vastaavissa tuloksissa on huomattava ero. Tutkimuksien erot voivat esimerkiksi johtua erisuuruista hienoainemääristä, hienoaineksen laadusta ja kosteuseroista hienoainesten välillä.

Tukikerroksen laatua on myös arvioitu (Göbel et al, 1994) suoraan signaalin nopeuden perusteella. Tutkimuksissa maatutkasignaalin nopeudeksi saatiin puhtaassa tukikerrosmateriaalissa 12–21 cm/ns ( $\epsilon_r$  noin 2,0–6,3) ja likaisessa 8–12 cm/ns ( $\epsilon_r$  noin 6,3–14,1). Vertailtaessa nopeuksia luvussa 4.2.1 esitettyihin ja maatutkatulkinnoissa sovellettuihin signaalin nopeuksiin (13 ja 14 cm/ns) voidaan todeta, että tulkinnoissa käytetyt signaalin nopeudet vastaavat keskimääräistä raidesepelimateriaalia.

Tukikerroksen laadun arvioiminen dielektrisyysien ja signaalin nopeuksien avulla on suhteellisen hankalaa, mikäli näitä käytetään referenssimenetelmien kanssa, koska dielektrisyys- ja nopeusarvot edellyttävät luotettavaa tietoa tukikerroksen paksuudesta. Tämän lisäksi dielektrisyysien ja signaalin nopeuksien arvot vastaavat tukikerroksen keskimääräisiä arvoja, joten arvoilla ei pystytä arvioimaan tukikerroksen laatua esimerkiksi pelkästään näytteenottotasolta.

Clark et al, (2004) ovatkin selvittäneet tukikerroksen laatua maatutkasignaalin taajuussisältöön perustuen. Tutkimuksissa analysoitiin maatutkasignaalien taajuussisältöä puhtaassa ja hienontuneessa raidesepelissä fast fourier transform (FFT) -analyysillä. Analyysillä muunnettiin aikatasossa oleva signaali taajuustasoon, joka esitettiin taajuusspektrinä (vrt. luku 4.4). Kuvassa 4.7 on esitetty 500 MHz antenni-taajuudella mitatun signaalin taajuusspektrit hyvälaatuiselle ja hienontuneelle raidesepelille. Sininen käyrä kuvastaa hyvälaatuisen sepelin taajuusspektriä ja punainen hienontuneen. Hienontuneen sepelin taajuusspektrissä korkeampia taajuuksia (1000–1800 MHz) on huomattavasti vähemmän kuin hyvälaatuisen raidesepelin spektrissä.



Kuva 4.7 Erilaatuisten sepeliaineksen FFT-analyysillä saadut taajuusspektrit (sininen: hyvälaatuinen materiaali, punainen: hienontunut materiaali) (Clark et al, 2004).

Tulos selittää hyvin Lambotin et al, (2004) tutkimusta, missä huonolaatuisen materiaalin sähkönjohtavuudessa havaittiin suurta kasvua verrattuna hyvälaatuisen materiaalin sähkönjohtavuuteen 1500 MHz korkeammilla taajuuksilla mitattaessa (vrt. kuva 3.7). Tällöin hienontuneen materiaalin kasvanut sähkönjohtavuus voisi osaltaan aiheuttaa kyseisten (1000–1800 MHz) korkeiden taajuuksien vaimenemisen.

Clarkin tutkimus osoitti, että raidesepelin laadun tunnistaminen taajuussisältöä analysoimalla olisi mahdollista. Kyseisen tutkimuksen periaate oli tämän työn keskeinen lähtökohta. Periaatteen toiminnan tarkastelu vaatii kuitenkin laaja-alaisia tutkimuksia ja mittauksia laadullisesti erilaisissa raidesepelimateriaaleissa ennen kuin maatutkasignaalin taajuussisällön eroilla voidaan suoraan selittää raidesepelin rakeisuuden vaihteluja. Tähän seuraavaksi esiteltävässä osuudessa pyrittiin.



## 5 MAATUTKAMITTAUKSET JA REFERENSSITUTKIMUKSET

### 5.1 Lähtökohdat tutkimuksille

Jotta maatutkatekniikalla voidaan arvioida ja paikantaa raekokojakaumaltaan ja hienontuneisuudeltaan erilaisia tukikerrosmateriaaleja, on tehtävä maatutkamittauksia rataolosuhteissa. Arvioimisen ja vertailun mahdollistamiseksi on lisäksi tiedettävä tukikerrosten todellinen tila. Tämä saadaan selvitettyä tukikerroksista haettavien näytteiden avulla.

Tähän työhön liittyen maatutkamittauksia tehtiin testiolosuhteissa TTY:n laboratoriossa, missä mitattiin raekokojakaumaltaan erilaisia keinotekoisesti rakennettuja tukikerroksia. Tämän lisäksi maatutkamittauksia tehtiin todellisissa rataolosuhteissa vasta valmistuneella Kerava-Lahti-oikoradalla ja kahdella ennakkotutkimusten perusteella valitulla kahden kilometrin pituisella tutkimusjaksolla rataosalla Tampere-Jyväskylä. Kyseiset rataosat valittiin mittaushaasteiksi, jotta tukikerroksen laadun vaihtelut olisivat selkeät.

Tutkimuskohteilta haettiin sepelinäytteitä, joita analysoitiin Tampereen teknillisen yliopiston (TTY) Maa- ja pohjarakenteiden laitoksen laboratoriossa. Näytteistä tarkasteltiin niiden rakeisuus-, vedensidonta- ja hienoainesominaisuuksia.

### 5.2 Maatutkalaitteisto ja aineiston käsittelyohjelmisto

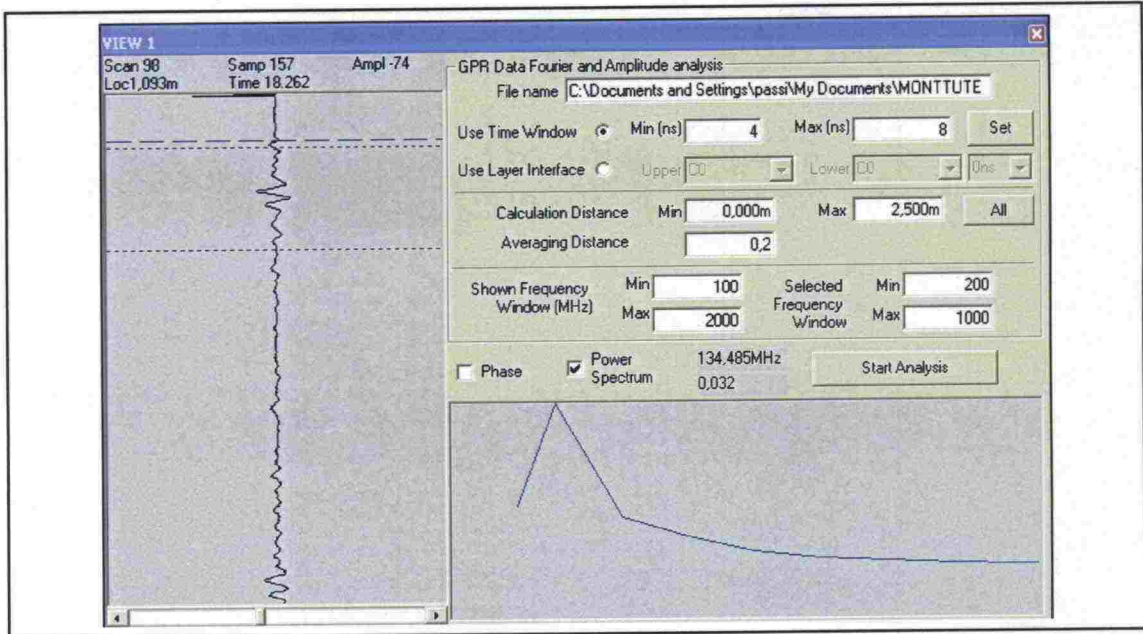
Rataosuuksilla tehty liikkuvat mittaukset tehtiin käyttämällä VR:n huoltoveturia (TKA). Veturin etuosaan kiinnitettiin ratamittauksia varten suunniteltu antenniteline, johon antennit voitiin asentaa. Maatutkalaitteistona käytettiin moniantennitekniikkaan perustuvaa 3d-Radar As:n valmistamaa Geoscope maatutkalaitteistoa, jonka antenni koostuu 31 antenniparista (ks. kuva 3.2). TTY:llä tehdyissä testeissä käytettiin samaa maatutkalaitteistoa, mutta mittaukset tehtiin liikuttelemalla antennia manuaalisesti. Lisäksi tehtiin sarja staattisia mittauksia antennien ollessa paikallaan.

Samanaikaisesti ratamittauksien kanssa taltioitiin mittalinjan koordinaatit Trimble AG132 GPS -mittauskalustolla sekä digitaalivideo, joka tallennettiin Roadscanners Oy:n valmistamalla RD Camlink -ohjelmalla. Maatutkalaitteistojen matkamittausanturi oli asennettuna TKA:n kiinnitetyn harjavaunun pyörän keskiöön magneetilla.

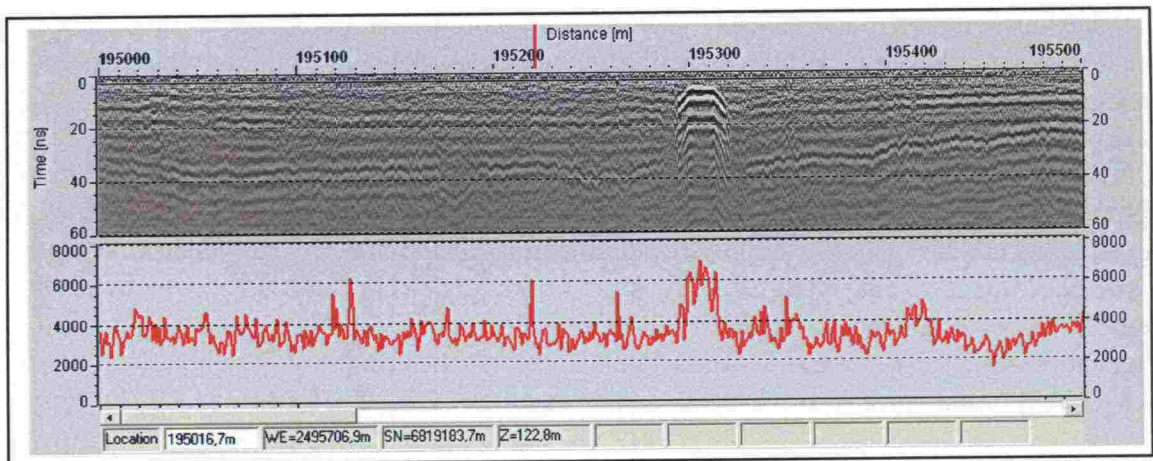
Mittausaineiston analyysit ja tulkinnot tehtiin Roadscanners Oy:n kehittämällä Railway Doctor -ohjelmalla. Ohjelmaan voidaan liittää eri lähteistä saatuja aineistoja, kuten koordinaattitietoa, videokuvaa tai ratageometritietoa jotka näkyvät samassa koordinaatistossa maatutkaprofiilin, tulkintojen ja analyysien kanssa (kuva 5.1).







Kuva 5.2 Yksittäisten signaalien taajuussisällön arvioimiseen käytetty Railway Doctor -ohjelman laskenta-algoritmi.

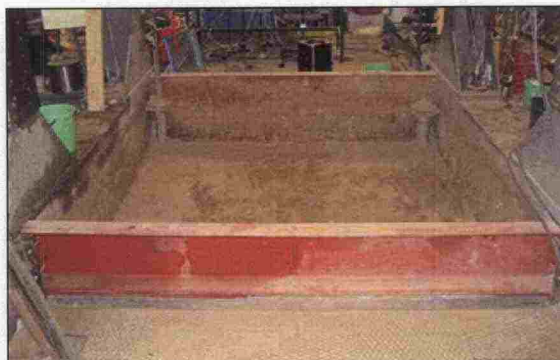


Kuva 5.3 Signaalin taajuuspinta-alan (200–1000 MHz) vaihtelu mittauslinjalla syvyydellä 4–8 ns (n. 0,3–0,5 m).

### 5.3 Maatutkamittaukset TTY:n laboratoriossa

#### 5.3.1 Keinotekoisten tutkimustapausten rakentaminen

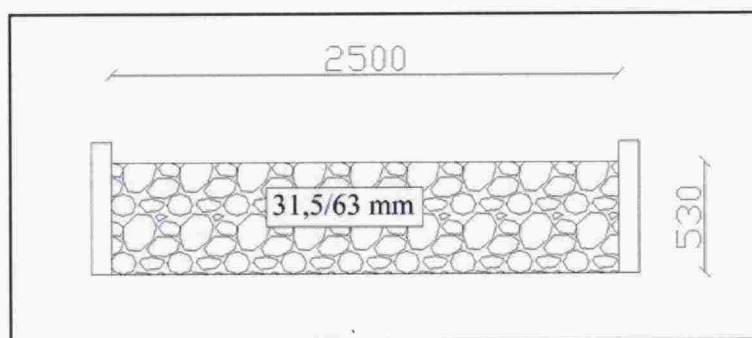
Tutkimuksissa rakennettiin keinotekoisesti erilaatuisia tukikerroksia kooltaan 2,5 x 2,5 m<sup>2</sup> olevaan metallilaitaiseen koekuoppaan (kuva 5.4), jonka syvyys oli noin viisi metriä. Altaan pohjalla oli kuivaa hiekkaa, jonka päälle tukikerrokset rakennettiin. Materiaaleina käytettiin puhdasta raidesepeliä 31,5/63 mm ja raekooltaan 0/31,5 mm olevaa kalliomursketta.



Kuva 5.4 Sepelitestissä käytetty koekuoppa ennen tukikerrosten rakentamista.

Maatutkamittauksia varten koekuoppaan rakennettiin kaksi erityyppistä tukikerrosta. Lisäksi näiden tukikerrosten kosteusolosuhteita muutettiin mittausten aikana siten, että mittaukset suoritettiin sepelikerroksen ollessa kuiva, 15 minuutin jälkeen kastelusta ja 20 tunnin kuluttua kastelusta.

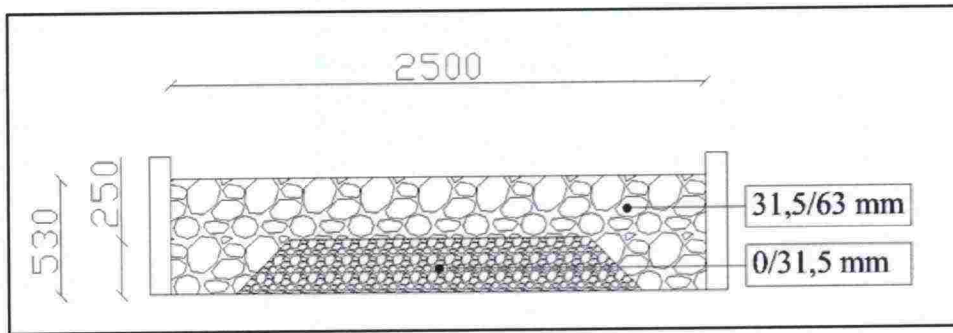
Kuvassa 5.5 on periaatekuva hyvälaatuisesta sepelikerroksesta. Kuopan pohjalla olevan kuivan hiekan päälle tehtiin noin 530 mm paksuinen sepelikerros puhtaasta, ja käyttämättömästä raidesepelistä.



Kuva 5.5 Tutkimusten hyvälaatuinen sepelikerros.

Huonolaatuinen sepelikerros (kuva 5.6) rakennettiin siten, että hiekkapohjan päälle koekuopan keskiosaan asennettiin noin 250 mm paksuinen kerros raekooltaan 0/31,5 mm kalliomursketta, jonka hienoainespitoisuus vastasi varsin hyvin todellisissa olosuhteissa hienontuneen raidesepelin hienoainespitoisuutta (vrt. luku 6.1.1). Murskeen päälle laitettiin puhdasta sepeliä, kunnes kerroksen yhteispaksuus oli noin 530 mm.

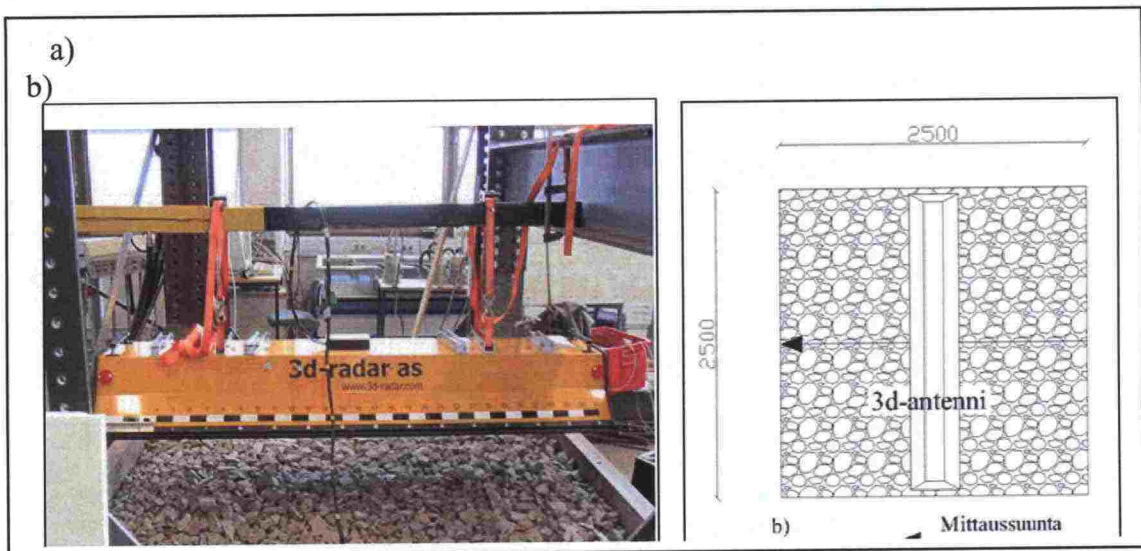




Kuva 5.6 Tutkimusten huonolaatuinen sepelikerros.

### 5.3.2 Maatutkamittaukset

Maatutkamittaukset tehtiin 3d-Radar As:n 3D-laitteistolla (vrt. kohta 5.2). Mittaukset tehtiin edellisessä luvussa esitetyille tutkimustapauksille antennin ollessa paikallaan telineeseen kiinnitettynä (kuva 5.7a). Lisäksi mittauksia tehtiin antennin ollessa liikkeessä. Liikkeen suunta oli koekuopan laidasta suoraan vastakkaiseen laitaan, jolloin mittalinjan pituus oli noin 2,5 metriä (kuva 5.7b).

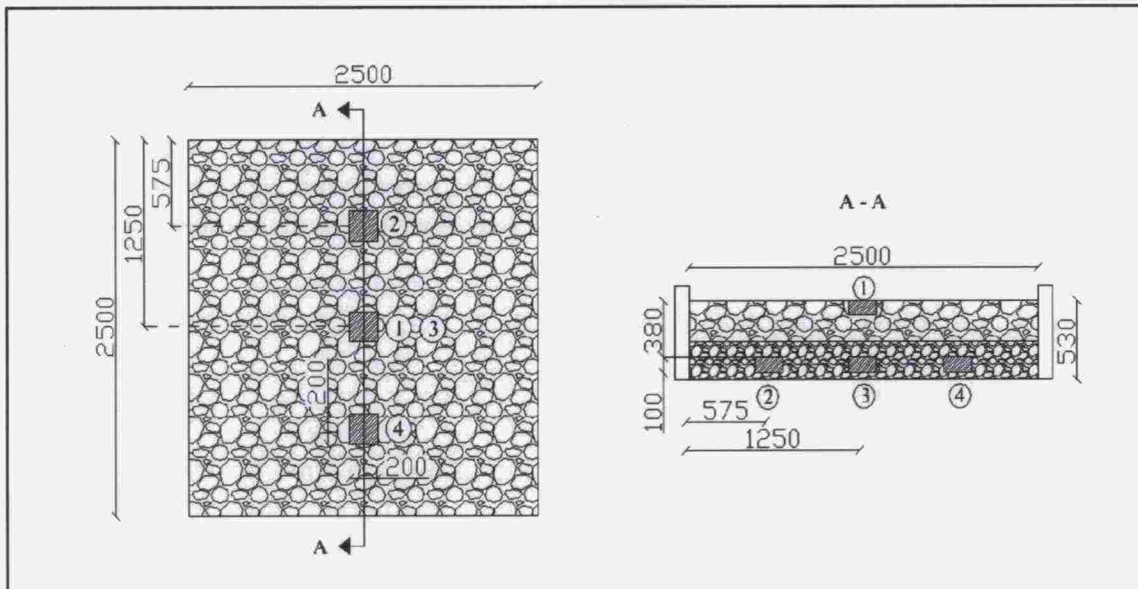


Kuva 5.7 a) Sepelitestieissä käytetty 3D-antenni telineeseen kiinnitettynä ja b) antennin liikkeen suunta.

Mittauksissa antenni asennettiin noin 380 mm korkeudelle sepelin yläpinnasta. Korkeus määrittyi sillä, että ratamittaukset suoritetaan tältä korkeudelta. 3D-laitteiston mittausaika oli 116 ns ja liikkuvien mittauksien mittausväli oli 7,5 cm (13,3 scan/m).

### 5.3.3 Sepelin näytteenotto ja rakeisuuden määrittäminen

Sepelitestien maatutka-analyysien referenssitiedoiksi sepelikerroksesta otettiin neljä näytettä kuvan 5.8 esittämistä kohdista. Yksi näyte otettiin puhtaasta sepelikerroksesta, ja kolme näytettä alemmasta murskekerroksesta.



Kuva 5.8 Näytepisteiden sijainti sepelikerroksessa.

Yksi näytteenottopiste oli 200 x 200 mm kokoinen alue, jonka syvyys oli 100 mm. Näytteiden otto tehtiin pinnan puhtaassa sepelikerroksessa lapiolla ja käsin. Syvemmällä olevat hienorakeisemmat näytteet otettiin standardin SFS-EN 13450 (2003) ohjeita mukaillen tutkimusta varten kehitetyllä metallisella näytteenottimella. Näytteenotin (200 x 200 mm) (kuva 5.9a/b) lyötiin lekalla murskekerrokseen 100 mm matkalta, jonka jälkeen näytteenottimen sisälle jäänyt materiaali kaavittiin pois.

Näytteenottimen käytön etuna on, että sen avulla näytteenottokohta pystytään rajaamaan tarkasti. Näytteenotinta käytettäessä on kiinnitettävä erityistä huomiota sen rakennepaksuuksiin ja reunojen muotoiluun, jotta se olisi riittävän kestävä, mutta myös helposti lyötävissä materiaaliin (vrt. kuva 2.4). Lisäksi näytteenottimen käyttö vaatii enemmän aikaa kuin näytteen ottaminen lapiolla/käsin.



Kuva 5.9a Näytteenotin.

Kuva 5.9b Näytteenotin lyötynä 10 cm syvyyteen kiviainekseen.

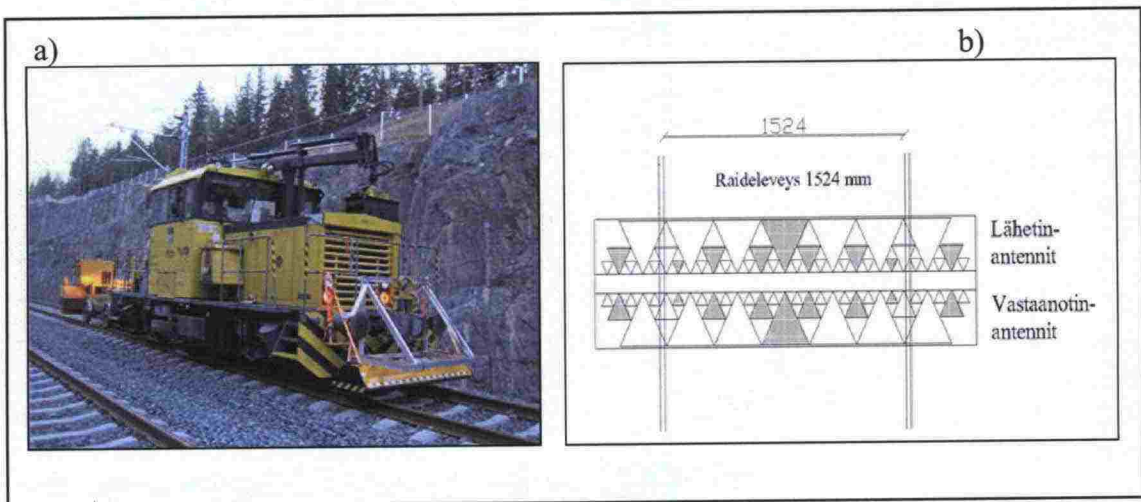


Maatutkamittauksien referenssinäytteille raekokojakaumat määritettiin pesuseulonnalla standardin SFS-EN 933-1 mukaisesti. Yhdelle likaista sepeliä kuvaavalle näytteelle (näyte 3) kuivaseulonta tehtiin kuitenkin hienoaineksen talteenoton mahdollistamiseksi ennen pesua. Näytteet seulottiin ensin käsin 63, 50, 40, 31,5, 25 ja 16 mm seuloilla, jonka jälkeen 16 mm seulan läpäissyt materiaali seulottiin täryttimessä seulasarjalla 8, 4, 2, 1, 0,5, 0,25, 0,125 ja 0,063 mm. Näytteen tärytysaika oli 15 minuuttia.

## 5.4 Tutkimukset Kerava–Lahti-oikoradalla

### 5.4.1 Maatutkamittaukset

Maatutkamittaukset toteutettiin Kerava–Lahti-oikoradalla molemmilla raiteilla välillä km 33–93. Geosopen 3D-laitteistolla (kuva 5.10a) mitattiin 200 mm välein (5 scan/metri) mittausajan ollessa 116 ns. 3D-mittauksissa käytössä oli yhdeksän lähetin-vastaanotinantennia (kuva 5.10b) valittuna siten, että mittausaineistoa saatiin myös pölkköjen päistä. Käytössä olevien antenniparien määrästä ja mittausvälistä johtuen mittausnopeus oli noin 25 km/h.



Kuva 5.10 a) 3D-laitteisto kiinnitettynä huoltoveturiin ja  
b) mittauksissa käytetyt antenniparit tummennettuna.

### 5.4.2 Sepelin näytteenotto ja rakeisuuden määrittäminen

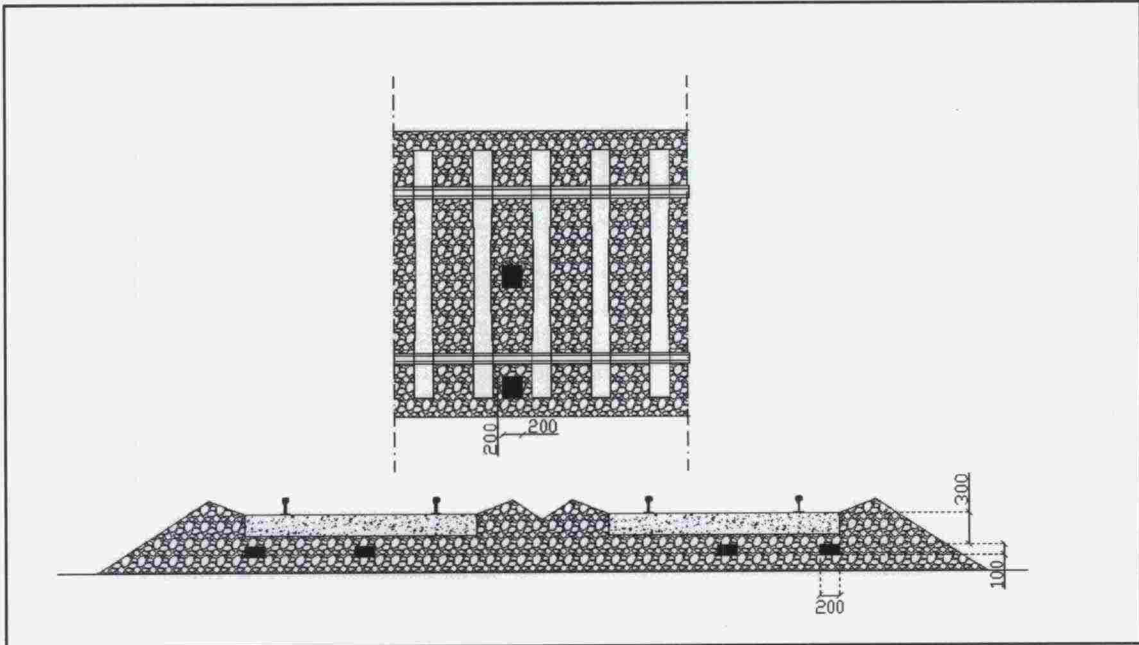
Sepelinäytteet haettiin molemmilta raiteilta taulukon 5.1 mukaisesti. Näytepisteiden väli oli noin kuusi kilometriä, ja näytepisteitä oli yhteensä 10 kpl/raide. Lisäksi rataosalta otettiin kuusi näytettä raiteiden keskeltä. Näin sepelinäytteitä otettiin yhteensä 26 kappaletta.



*Taulukko 5.1 Raidesepelinäytteiden paikat (molemmat raiteet).*

| Kilometri                |
|--------------------------|
| 34+300, pölkyn pää       |
| 40+520, pölkyn pää       |
| 46+820, pölkyn pää       |
| 46+820, raiteen keskellä |
| 53+040, pölkyn pää       |
| 58+500, pölkyn pää       |
| 65+300, pölkyn pää       |
| 65+300, raiteen keskellä |
| 70+960, pölkyn pää       |
| 77+850, pölkyn pää       |
| 84+100, pölkyn pää       |
| 84+100, raiteen keskellä |
| 90+270, pölkyn pää       |

Raidesepelinäytteiden ottokohta tukikerroksessa on esitetty kuvassa 5.11. Näytteenotto-pisteet sijaitsivat raiteiden ulkoreunalla (kuusi näytettä myös raiteen keskeltä). Näytteet otettiin Raidesepelin laadun tutkimusohjeen (Ratahallintokeskus, 1997) mukaisesta paikasta tukikerroksessa käsin pientä lapiota apuna käyttäen.



*Kuva 5.11 Raidesepelinäytteiden ottokohta tukikerroksessa Kerava–Lahti-oikoradalla.*

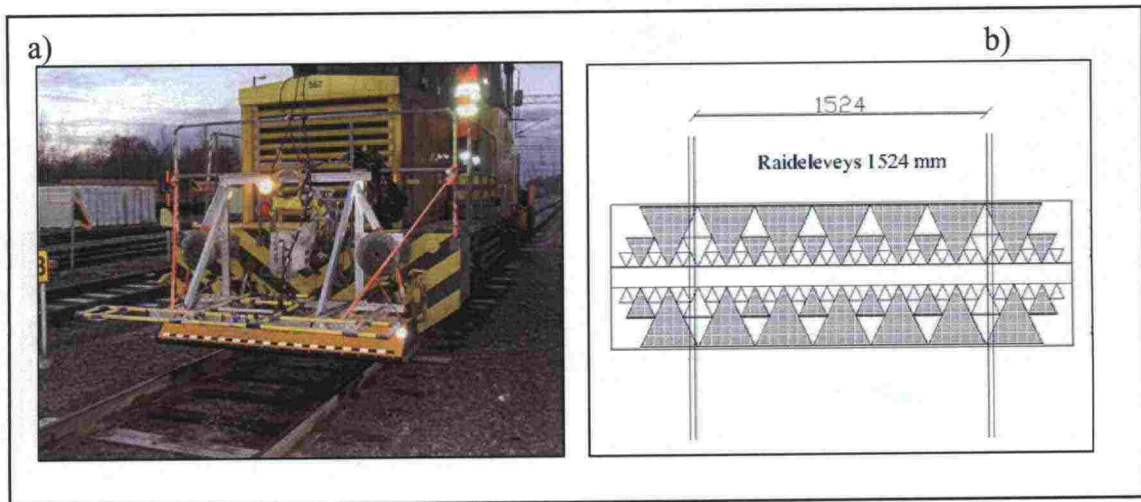
Rataosan raidesepelinäytteiden raekokojakaumat määritettiin pääsääntöisesti luvussa 5.3.3 esitetyllä pesuseulontamenettelyllä. Neljälle näytteelle (km 46+820E, 46+820P, 65+300E ja 84+100E) raekokojakaumat määritettiin kuivaseulontamenettelyllä ja sen jälkeisellä pesulla näytteiden hienoaineksen talteen saamiseksi.

## 5.5 Tutkimukset rataosalla Tampere–Jyväskylä

### 5.5.1 Maatutkamittaukset

Tutkimukset rataosalla Tampere–Jyväskylä keskitettiin kahteen kahden kilometrin pituiseen tutkimuskohteeseen, jotka sijaitsivat välillä Tampere–Orivesi km 195–197 eteläraiteella, ja välillä Jämsänkoski–Jyväskylä km 328–330. Tutkimuspaikat valittiin aiempiin tutkimuksiin (Silvast & Nurmikolu, 2005) perustuen kohteiksi, joissa raidesepeli tiedettiin varsin hienontuneeksi ja toisaalta arveltiin olevan suuria paikallisia vaihteluita raidesepelin laadussa, sekä pituus- että poikkileikkaussuunnassa.

Kuvassa 5.12a on esitetty mittauksissa käytetty 3D-antenni kiinnitettynä veturin etuosaan. Maatutkamittaukset tehtiin molemmissa tutkimuskohteissa kuvassa 5.12b esitetyillä 13 antenniparilla. Mittausväli oli 200 mm (5 scan/metri) ja mittausaika oli 116 ns. Tämän järjestelmän mahdollistama mittausnopeus oli noin 20 km/h.



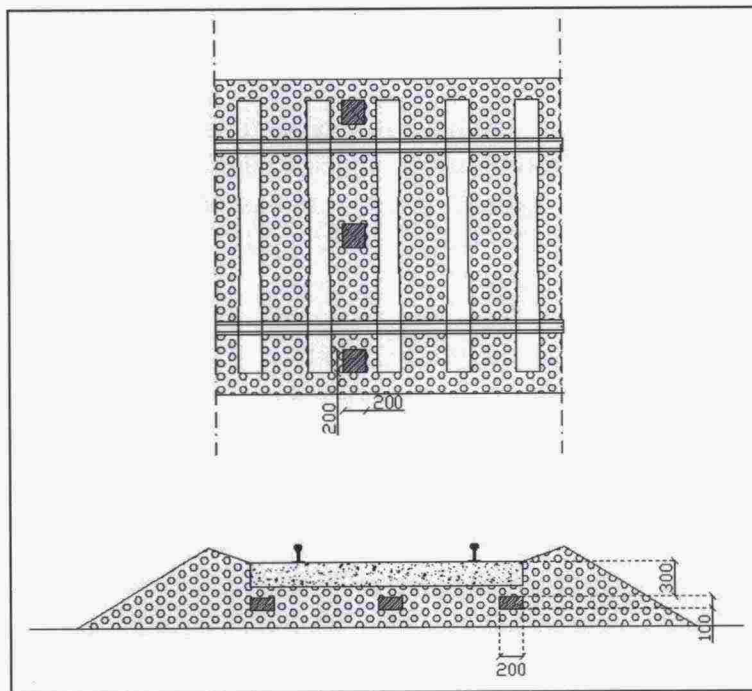
Kuva 5.12 a) Mittauksissa käytetty 3D-antenni telineeseen kiinnitettynä ja b) mittauksissa käytetyt antenniparit tummennettuina.

### 5.5.2 Sepelin näytteenotto ja rakeisuuden määrittäminen

Näytepisteiden paikat määritettiin alustavien maatutka-analyysien, aikaisempien tutkimuksien ja radalla olevien erityiskohteiden (sillat, tunnelit) mukaan. Näytteenotto-kohtien paikantamiseen hyödynnettiin sähköpylväitä, joista mittanauhalla mitaamalla voitiin määrittää näytepisteiden paikat. Sepelinäytteitä otettiin molemmista tutkimuspaikoista alla olevan taulukon 5.2 mukaisesti. Näytteet otettiin pölkkyjen päistä Raidesepelin laadun tutkimusohjeen (Ratahallintokeskus, 1997) mukaisesta paikasta ja raiteen keskeltä. (kuva 5.13). Näytteiden lukumäärä oli tällöin yhteensä 30 kpl/tutkimuskohde, joten koko rataosalta näytteitä kertyi 60 kappaletta. Näytteet otettiin tukikerroksesta käsin pientä lapiota apuna käyttäen huomioiden erityisesti hienorakeisen materiaalin saaminen mukaan näytteeseen.

Taulukko 5.2 Raidesepelinäytteiden paikat rataosalla Tampere–Jyväskylä.

| Kilometri          | Kilometri       |
|--------------------|-----------------|
| Tpe-Ov / E 195+065 | Jmk-Jyv 328+120 |
| Tpe-Ov / E 195+325 | Jmk-Jyv 328+160 |
| Tpe-Ov / E 195+450 | Jmk-Jyv 328+180 |
| Tpe-Ov / E 195+760 | Jmk-Jyv 328+240 |
| Tpe-Ov / E 195+900 | Jmk-Jyv 328+270 |
| Tpe-Ov / E 196+170 | Jmk-Jyv 329+330 |
| Tpe-Ov / E 196+345 | Jmk-Jyv 329+410 |
| Tpe-Ov / E 196+520 | Jmk-Jyv 329+720 |
| Tpe-Ov / E 196+625 | Jmk-Jyv 329+780 |
| Tpe-Ov / E 196+860 | Jmk-Jyv 329+920 |



Kuva 5.13 Raidesepelinäytteiden ottokohta tukikerroksessa rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimuspaikoissa.

Molempien tutkimuskohteiden hienoaineksen laadun vaihtelut pyrittiin selvittämään tarkasti, joten jokaisen tarkastellun poikkileikkauksen oikean puoleisesta näytteestä otettiin seulontamenettelyssä hienoaines talteen lisätutkimuksia varten. Hienoainesta otettiin talteen myös radan keskeltä neljästä poikkileikkauksesta. Näille sepelinäytteille (2 x 14 kpl) tehtiin pesuseulonnan sijaan kuivaseulonta ja sen jälkeinen pesu hienoaineksen talteen saamiseksi. Lopuille 32 näytteelle raekokojakauma määritettiin suoraan pesuseulonnalla.



## 5.6 Näytteiden tarkentavat laboratoriotutkimukset

### 5.6.1 Karkeiden partikkelien vedenimu

Karkeiden partikkelien vedenimukoe tehtiin raekokovälille 4/31,5 mm standardin SFS-EN 1097-6 luvun 8 mukaisesti. Ennen koetta näytteistä eroteltiin silmämääräisesti pois orgaaninen aines, puun palaset sekä metallinkappaleet, koska humusaines vääristäisi tuloksia runsaan vedenimunsa takia. Kokeessa näytemateriaalia pidetään 24 tuntia vedellä kyllästetyssä pyknometrissä, jonka jälkeen näyte kuivataan pintakuivaksi. Kokeen tuloksena saadaan näytteen vedenimu, joka kuvaa näytteen huokosiin tunkeutuvan veden määrää ilmaistuna painoprosentteina kuivan näytteen massasta. Suuri vedenimu ilmaisee suurta huokoisuutta ja siten mahdollista alttiutta varsinkin pakkasrapautumiselle. Toisaalta suuri vedenimu vaikuttaisi lukujen 3 ja 4 mukaisesti maatutkasignaalin kulkuun. Huokosissa oleva vesi lisää materiaalin sähkönjohtavuutta, joka taas vaimentaa signaalia.

Vedenimukoetta varten rataosalla Tampere–Jyväskylä yhdistettiin saman ratapoikkileikkauksen näytteiden 4/31,5 mm kiviaines yhdeksi näytteeksi, koska koe vaatii näytemateriaalia vähintään 5 kg. Tällöin kokeen tuloksena saatava vedenimu vastaa poikkileikkauksesta otettujen näytteiden 4/31,5 mm kiviaineksen keskimääräistä vedenimua.

### 5.6.2 Tukikerroksnäytteiden hienoaineksen laatu

#### Veden adsorptio

Hienoaineksen vedensidontaominaisuuksia tarkasteltiin veden adsorptiokokeessa (PANK-2108, 1997). Menetelmässä määritetään hienoaineksen kykyä adsorboida vesihöyryä 100 % suhteellisessa kosteudessa. Tuloksena saadaan vedenadsorptioluku, mikä kuvaa näytteeseen 7 vuorokauden aikana adsorboituneen veden määrää ilmaistuna painoprosentteina kuivasta massasta.

#### Humuspitoisuus

Talteen otetuista hienoainesnäytteistä määritettiin humuspitoisuus polttomenetelmällä Geoteknisten laboratorio-ohjeiden (GLO-85, 1985) mukaisesti. Menetelmässä näytettä hehkutetaan vähintään yhden tunnin ajan 800 asteen lämpötilassa, jolloin hienoaineksessa oleva orgaaninen aines palaa pois. Poltossa tapahtunut hehkutushäviö kuvaa palaneen massan prosentuaalista osuutta alkuperäisen kuivan näytteen massa.

#### Sedigraph-analyysi

Sedigraph-laitteistolla määritettiin näytteiden hienoainesten partikkelikokojakauma. Menetelmän periaatteena on raekooltaan alle 0,063 mm hienoainespartikkelien sedimentaationopeuden riippuvuus partikkelikoosta. Sedigraph-laitteistossa tarkastellaan partikkelien sedimentaatiota näytteen eri tasoille kohdistetun röntgensäteilyn avulla.

## 6 TULOKSET JA NIIDEN ARVIOINTI

### 6.1 TTY:n laboratoriossa tehtyjen testien tulokset

#### 6.1.1 Referenssitutkimusten tulokset

TTY:n laboratoriossa suoritettujen maatutkamittausten referenssitiedoiksi otettiin keino-tekoisesti tehdystä tukikerroksesta neljä näytettä (vrt. kuva 5.8). Yksi näytteistä otettiin pinnan puhtaasta, hyvälaatuisesta raidesepelistä (näyte 1) ja loput kolme näytettä (näytteet 2, 3 ja 4) hyvälaatuisen raidesepelin alla olevasta murskeesta 0/31,5 mm. Alla olevassa taulukossa 6.1 on esitetty näytteistä määritetyt rakeisuusluvut ja näytteen 3 hienoaineksesta määritetty humuspitoisuus ja veden adsorptio. Lisäksi murskeesta 0/31,5 mm määritettiin lajitteen 4/31,5 mm vedenimu. Näytteiden tarkemmat rakeisuus-tiedot on esitetty liitteessä 1.

*Taulukko 6.1 Näytteiden rakeisuusluvut ja hienoainestutkimuksien tulokset.*

| Näyte | Läpäisy-%<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy-%<br>1 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku | Läpäisy-%<br>0,063 mm<br>seulalla | Hienoainestutkimukset |                         |
|-------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------|
|       |                                |                               |                    |                                   | Humus-<br>pitoisuus   | Veden<br>adsorptio<br>% |
| 1     | 9,8                            | 2,0                           | 15                 | 0,4                               |                       |                         |
| 2     | 89,4                           | 24,9                          | 166                | 4,8                               |                       |                         |
| 3     | 81,7                           | 17,4                          | 138                | 3,2                               | 1,0                   | 1,7                     |
| 4     | 87,7                           | 22,4                          | 158                | 4,3                               |                       |                         |

Murskeesta 0/31,5 mm määritetty karkeiden partikkelien vedenimu: WA24 = 0,11

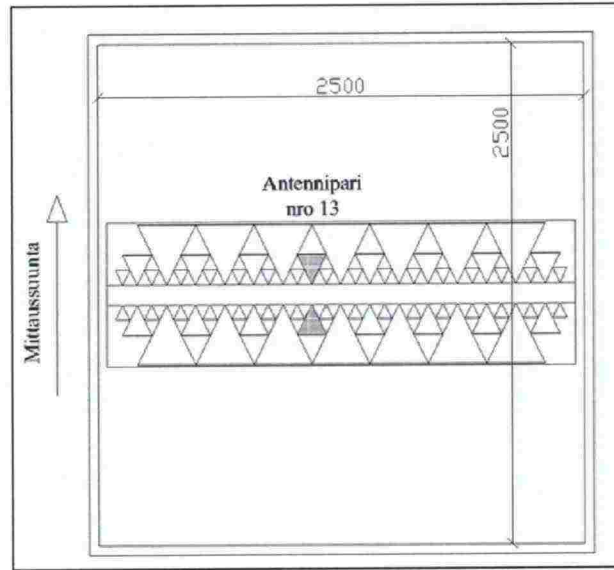
Murskeesta otettujen näytteiden erittäin suuret rakeisuusluvut eivät ole suoraan verrattavissa raidesepeliin, koska murskeen maksimirakekoko on 31,5 mm eikä raidesepeliä vastaava 63 mm. Kuitenkin murskenäytteiden hienoainespitoisuuksien suuruusluokka vastaa voimakkaasti hienontuneista raidesepelinäytteistä määritettyä tasoa.

#### 6.1.2 Maatutkamittausten havainnot

Maatutkamittaukset tehtiin TTY:n laboratoriossa luvussa 5.3.1 kuvatuille keino-tekoisesti rakennetuille tutkimustapauksille 3D-laitteistolla. Näiden mittausten tavoitteena oli tutkia maatutkasignaalin taajuussisällön muutoksia raekooltaan ja kosteusolosuhteiltaan erilaisissa materiaaleissa ja siten löytää signaalin taajuusalue, jossa suurimmat pinta-alamuutokset tapahtuvat.

Tutkimuksissa analysoitiin kuvan 6.1 mukaisen antenniparin aineistoa. Koekuopan metallilaidoista aiheutuva mahdollinen häiriö maatutkasignaalin kulkuun on kyseistä antenniparia käytettäessä mahdollisimman vähäistä, koska antennipari sijaitsee 3D-antennin keskellä.

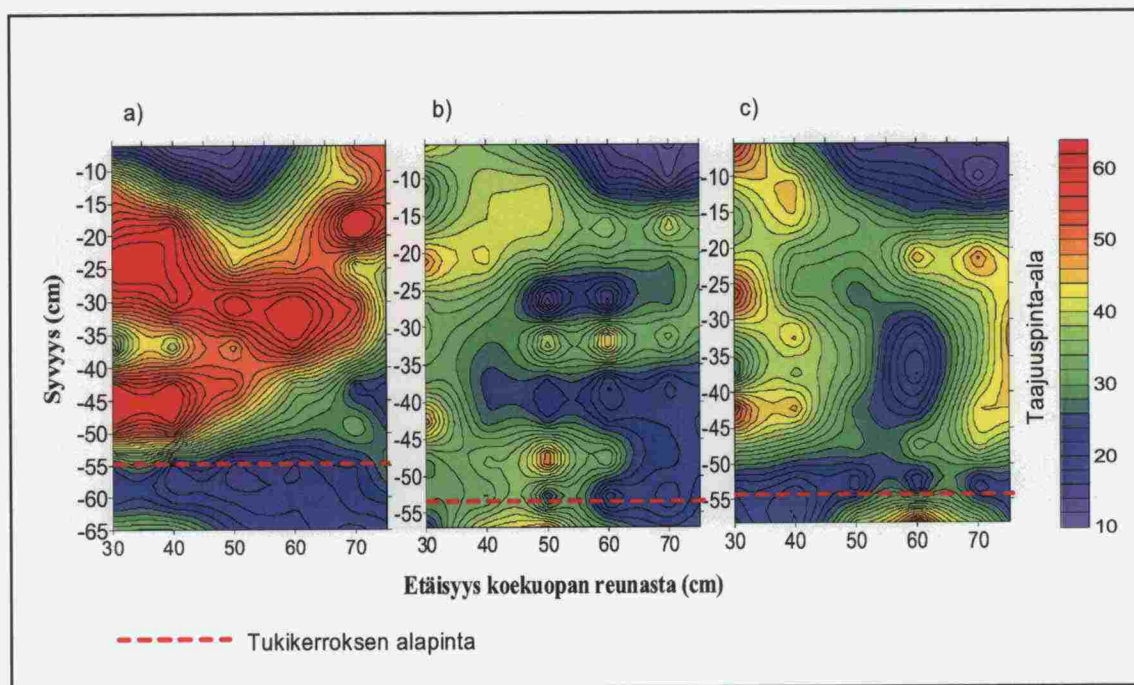




Kuva 6.1 TTY:n laboratoriossa tehtyjen mittausten analysoinnissa käytetty antennipari.

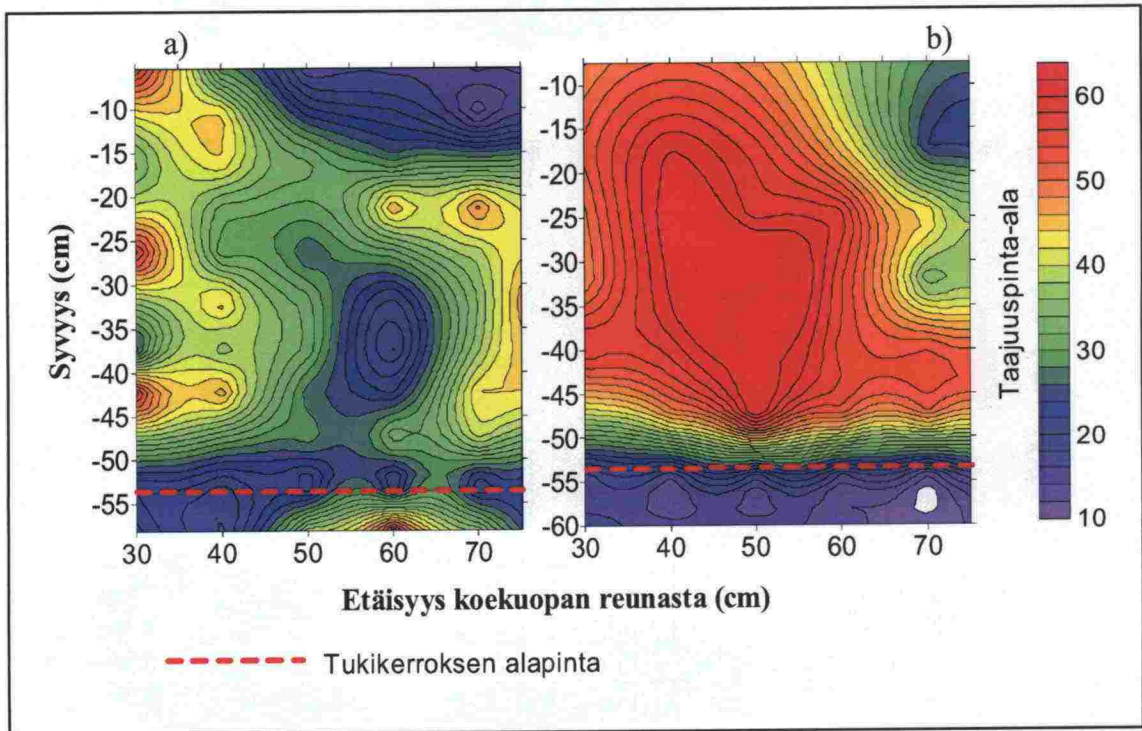
Maatutkamittaukset tehtiin keinotekoisesti rakennetuille erilaatuisille tukikerroksille niiden ollessa kuivia, 15 minuuttia kastelun jälkeen ja 20 tuntia kastelun jälkeen. Kuvassa 6.2 on tarkasteltu maatutkasignaalin korkeiden taajuuksien (1000–1900 MHz) pinta-aloja hienontuneessa tukikerroksessa (ks. kuva 5.6) kuivana (6.2a), 15 minuuttia kastelusta (6.2b), ja 20 tuntia kastelusta mitattuna (6.2c). Kuvasta nähdään selkeästi, miten vesi vaikuttaa korkeiden taajuuksien vaimenemiseen murskekerroksen kohdalla tukikerroksessa. Tukikerrosta kasteltaessa murskeen hienoaines sitoo itseensä vettä, jolloin kasvaneen dielektrisyyden seurauksena signaalin korkeat taajuudet vaimenevat murskeen kohdalla (vrt. kuva 3.7). Vaimentuminen erottuu parhaiten 20 tuntia kastelusta mitattuna, jolloin vesi on ehtinyt imeytyä kunnolla hienoinekseen ja ylimääräinen vesi on haihtunut ja valunut alas. Kuvasta 6.2b on nähtävillä se, että murskeen ja puhtaan raidesepelin rajapintaan (30–35 cm syvyyteen) muodostuu vahva heijaste, mikä nostaa taajuuspinta-alaa tällä kohdalla. Heijasteen syntyminen johtuu murskeen suuresta vesipitoisuudesta verrattuna raidesepelin vesipitoisuuteen. Kuvasta nähdään lisäksi murskeen ja sen alapuolella olevan hiekan rajapinnan erottuminen.





Kuva 6.2 Korkeiden taajuuksien (1000–1900 MHz) pinta-alakartta hienontuneessa tukikerroksessa murskeen kohdalla mitattuna a) kuivana b) 15 minuuttia kastelusta c) 20 tuntia kastelusta.

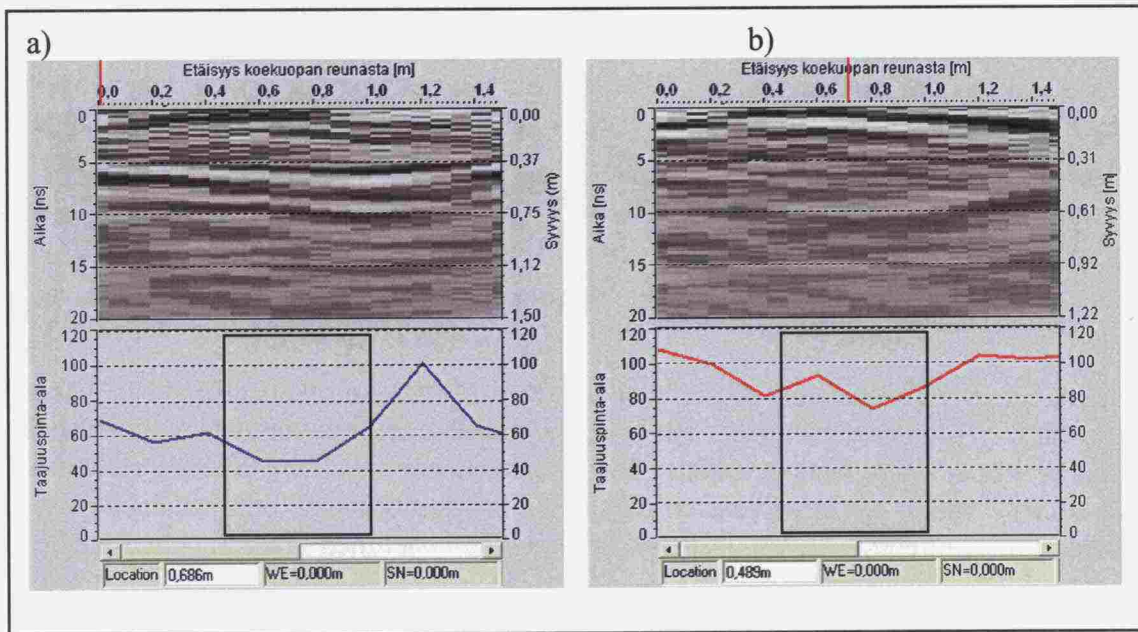
Kuvassa 6.3 on vertailtu vastaavia maatutkasignaalin korkeita taajuuksia (1000–1900 MHz) puhtaassa ja mursketta sisältävässä tukikerroksessa 20 tuntia kastelusta mitattuna. Kuva 6.3a esittää hienontunutta tukikerrosta (ks. kuva 5.6) ja kuva 6.3b puhdasta tukikerrosta (ks. kuva 5.5). Taajuuspinta-alaero on erittäin suuri. Tuloksesta voidaan päätellä, että puhtaaseen tukikerrokseen kaadettu vesi on valunut alas pohjahiekkaan ja osaltaan myös haihtunut, kun taas hienontuneessa tukikerroksessa vesi on imeytynyt murskeeseen. Puhtaan raidesepelin ja hiekan rajapinta erottuu erittäin selkeästi.



Kuva 6.3 a) Mursketta sisältävän tukikerroksen ja b) puhtaan tukikerroksen korkeiden taajuuksien pinta-alakartta murskekerroksen kohdalla 20 tuntia kastelusta mitattuna.

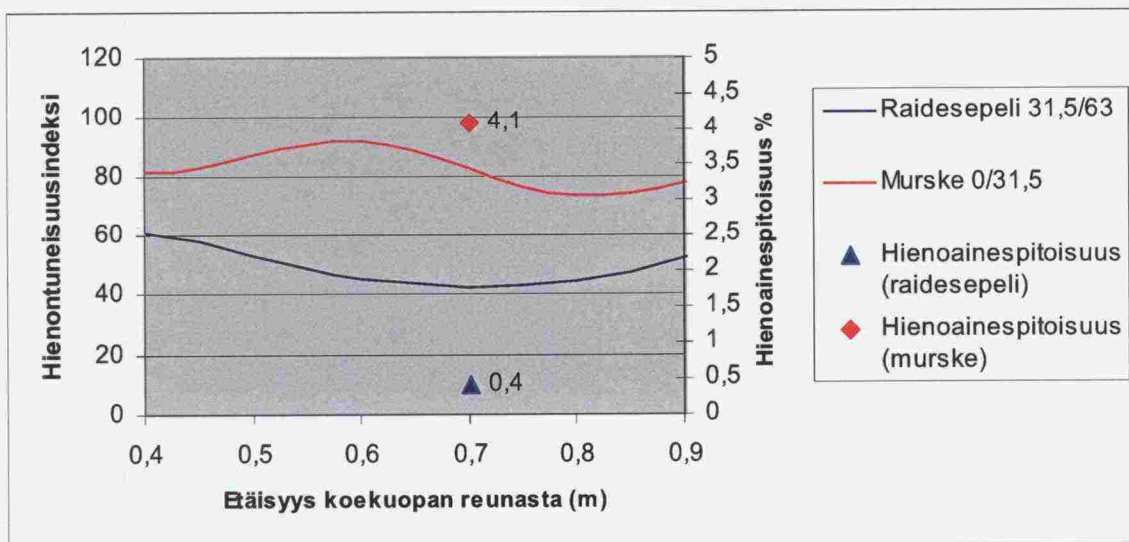
Edellä kuvattujen vertailujen perusteella kehitettiin korkeiden taajuuksien (1000–1900 MHz) pinta-alaan perustuva raidesepelin hienontuneisuusindeksi. Indeksiluku kasvaa raidesepelin hienontuneisuuden lisääntyessä. Kuvassa 6.4 on esimerkkinä hienontuneisuusindeksin arvon vertailua Railway Doctor -ohjelman näkymässä. Kuvassa on esitetty sinisellä viivalla puhtaan tukikerroksen (kuva 6.4a) ja punaisella viivalla hienontuneen tukikerroksen (kuva 6.4b) hienontuneisuusindeksi. Molemmat maatutka-aineistot ovat mitattu 20 tuntia tukikerroksen kastelusta. Kuvan tutkimustapauksien indeksiluvut ovat laskettu tukikerroksen ja pohjahiekan rajapinnasta 3 ns ylöspäin, mikä vastaa noin 200 mm korkuista kerrosta. Kuvaan on rajattu mustalla viivalla koekuopan keskiosa, jossa hienontuneen tukikerroksen murskekerros sijaitsee. Reunoilla koekuopan metallilaidat voivat aiheuttaa häiriötä signaaliin, joten tutkimustapauksien indeksilukuja on järkevää vertailla keskiosan alueella. Puhtaassa raidesepelissä indeksiluku on noin 50–60, kun vastaavasti murskeessa indeksiluku on noin 80–90.





Kuva 6.4 Hienontuneisuusindeksi a) puhtaassa raideseipelissä ja b) hienontuneessa tukikerroksessa. Kehystetty alue kuvaa kohtaa, jolle mursketta sijoitettiin.

Kuvassa 6.5 on vertailtu edellä mainittuja hienontuneisuusindeksejä näytteistä määritettyihin hienoainespitoisuuksiin. Kuvassa punainen piste kuvaa murskeesta määritettyä keskimääräistä hienoainespitoisuutta ja sininen raidesepelistä määritettyä hienoainespitoisuutta. Tuloksesta voidaan päätellä, että hienoaineksen määrällä on merkittävä vaikutus maatutkasignaalin korkeiden taajuuksien vaimenemiseen materiaalissa.



Kuva 6.5 Näytteistä määritettyjen hienoainesmärien vertailu hienontuneisuusindeksiin.

Clark et al. (2004) tutkimuksessa havaittiin, että hienontunut raideseepeli vaimentaa maatutkasignaalin korkeita taajuuksia selvästi enemmän kuin hyvälaatuinen raideseepeli (vrt. kuva 4,7) ja työ perustuikin maatutkasignaalin taajuuksien 1000–1900 MHz

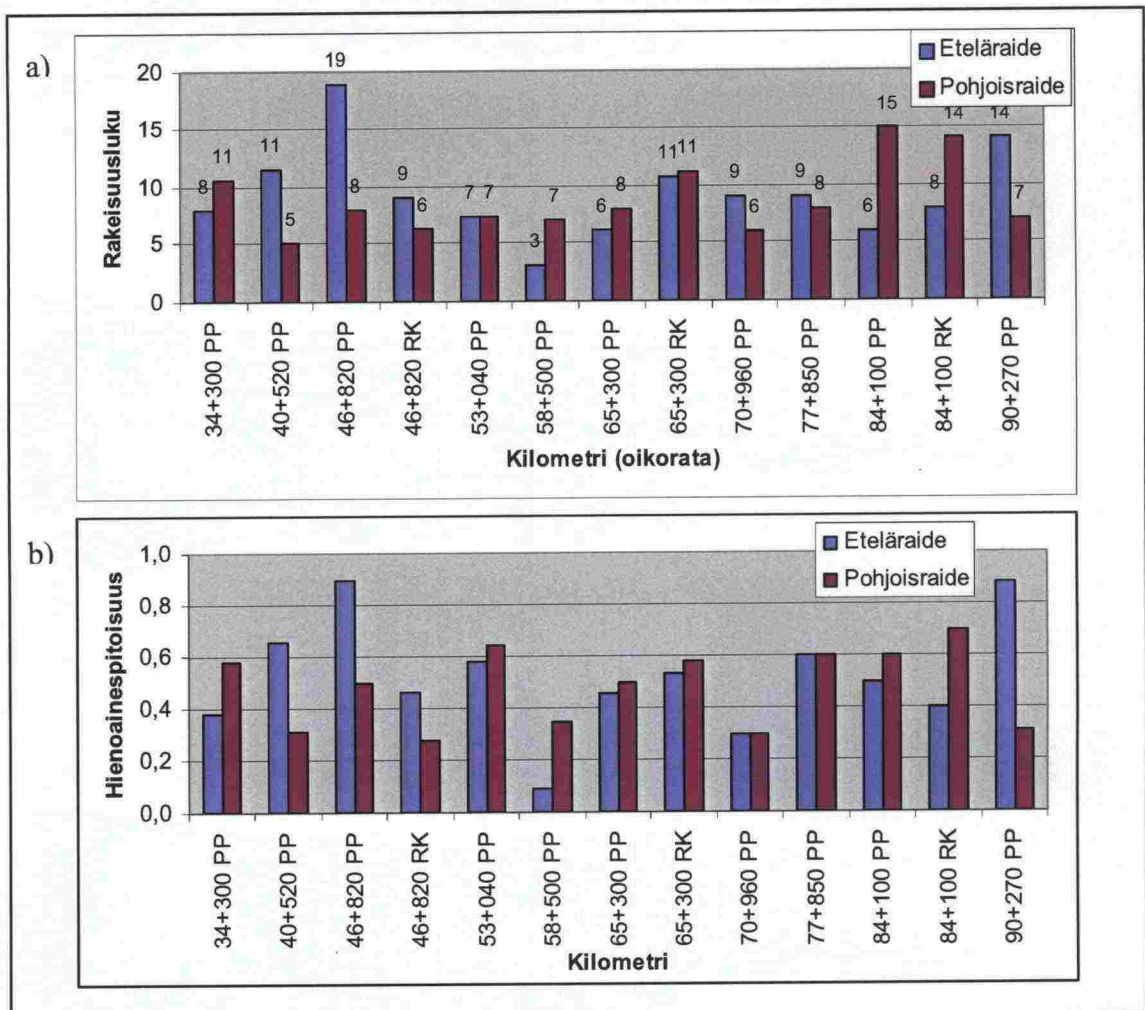


analysointiin. Vertailuja tehtiin myös muille taajuusväleille, kuten 1300–1900 MHz ja 1000–1500 MHz, mutta tutkimuksiin valitulla taajuusvälillä 1000–1900 MHz erot näytetietojen ja taajuuspinta-alan välille saatiin parhaiten esille. Tätä taajuusväliä käytetäänkin seuraavaksi esiteltävissä radalla tehtyjen maatutkamittausten ja näytetietojen välisissä vertailuissa.

## 6.2 Ratamittausten tulokset

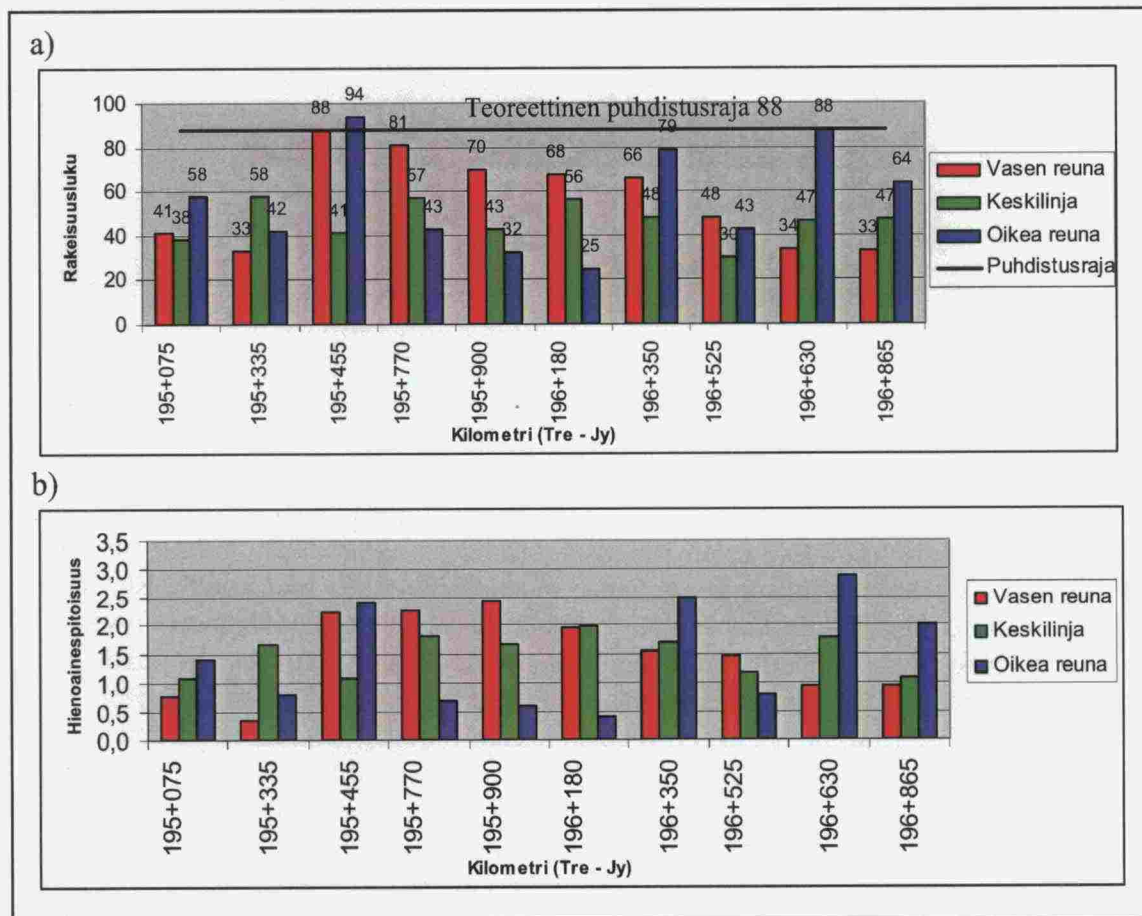
### 6.2.1 Referenssitutkimusten tulokset

Kuvassa 6.6 on Kerava–Lahti-oikoradalta haettujen näytteiden rakeisuusluvut ja hienoainesmäärät. Tuloksista nähdään, että rataosan raidesepeli on odotusten mukaisesti rakeisuudeltaan varsin karkearakeista. Rakeisuusluvuissa tapahtuu hieman vaihtelua, mikä selittyy varsin hyvin pelkästään näytteiden erisuuruisista 25 mm seulan läpäisyprosentista. Liitteessä 2 on esitetty oikoradalta haettujen raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät.



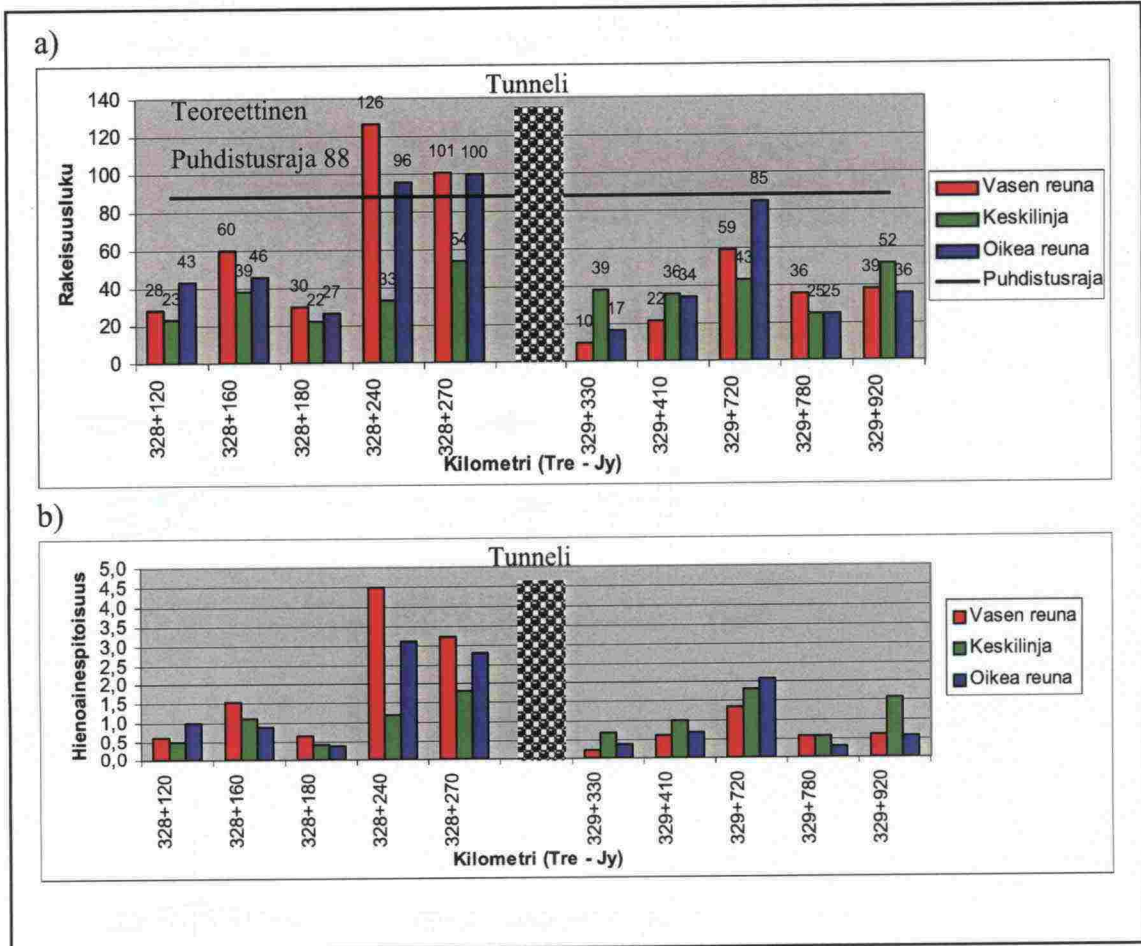
Kuva 6.6 a) Kerava–Lahti-oikoradan näytteiden rakeisuusluvut ja b) näytteiden hienoainespitoisuudet (PP = pölkyn pää, RK = raiteen keskellä).

Rataosalla Tampere–Jyväskylä oli kaksi kahden kilometrin pituista tutkimuskohdetta, jotka sijaitsivat kilometreillä 195–197 ja 328–330. Molemmista kohteista haettiin yhteensä 30 kpl raidesepelinäytettä. Näytepisteiden paikat valittiin alustavien maatutka-analyysien ja aiempien tutkimuksien (Silvast & Nurmikolu, 2005) perusteella siten, että näytepisteiden välillä raidesepelin laadussa olisi mahdollisimman suuria vaihteluita, sekä radan pituus- että poikkisuunnassa. Kuvissa 6.7 ja 6.8 on esitetty tutkimuskohteilta haettujen näytteiden rakeisuusluvut ja hienoainesmäärät. Rakeisuusluku ja hienoainesmäärä vaihtelevat suuresti eri näytepisteiden välillä. Muutamassa poikkileikkauksessa raidesepelin rakeisuusluku on reunoilla saavuttanut teoreettisen puhdistusrajan 88, vaikka raiteen keskilinjalla raidesepeli on vielä kohtuullista. Erityisen hienontunutta raidesepeliä on ennen tunnelia otetuissa reunanäytteissä ratakilometreillä 328+240 ja 328+270. Tässä työssä reunanäytteellä tarkoitetaan pölkkyjen päästä otettua raidesepelinäytettä. Liitteessä 3 on esitetty rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimuskohteiden km 195–197 ja 328–330 raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät.



Kuva 6.7 Rataosan Tampere–Jyväskylä a) näytteiden rakeisuusluvut ja b) hienoainespitoisuudet välillä km 195–197.





Kuva 6.8 Rataosan Tampere–Jyväskylä a) näytteiden rakeisuusluvut ja b) hienoainespitoisuudet välillä km 328–330.

Taulukoissa 6.2 ja 6.3 ja liitteessä 4 on esitetty näytteiden hienoaineksille tehtyjen tarkentavien laboratoriotutkimusten tulokset. Kahden oikoradalta haetun näytteen hienoaineksesta määritettiin humuspitoisuus ja neljän näytteen hienoaineksesta veden adsorptio (taulukko 6.2). Taulukossa 6.3 on vastaavasti rataosalla Tampere–Jyväskylä sijaitsevien tutkimuskohteiden näytteiden hienoaineskokeiden tulokset. Taulukossa on lisäksi raekoosta 4/31,5 mm määritetyt vedenimut WA<sub>24</sub>. Tuloksista nähdään, että km 195–197 välisen tutkimuskohteen hienoaineksen humuspitoisuus on huomattavasti suurempi kuin jälkimmäisen tutkimuskohteen. Ensimmäisen tutkimuskohteen suurempi humuspitoisuus vaikuttaa osaltaan myös suurempaan hienoaineksen veden adsorptioon. Edellä mainittujen hienoainestutkimuksien lisäksi hienoainesten partikkelikokojakaumat on määritetty sedigraph-analyyseillä, joiden tulokset on esitetty liitteessä 4.



*Taulukko 6.2 Kerava–Lahti-oikoradan tukikerrosnäytteiden hienoaineksen hehkutushäviö ja veden adsorptio.*

| Näyte km<br><i>E, eteläraide;</i><br><i>P, pohjoisraide</i> | Hehkutus-<br>häviö (%) | Veden<br>adsorptio |
|---|------------------------|--------------------|
| 46+820P, pölkyn pää   | 1,9                    | 2,5                |
| 46+820E, pölkyn pää   | -                      | 2,6                |
| 65+300E, pölkyn pää   | -                      | 2,2                |
| 84+100E, pölkyn pää   | 1,4                    | 2,1                |
| KA  | 1,6                    | 2,3                |

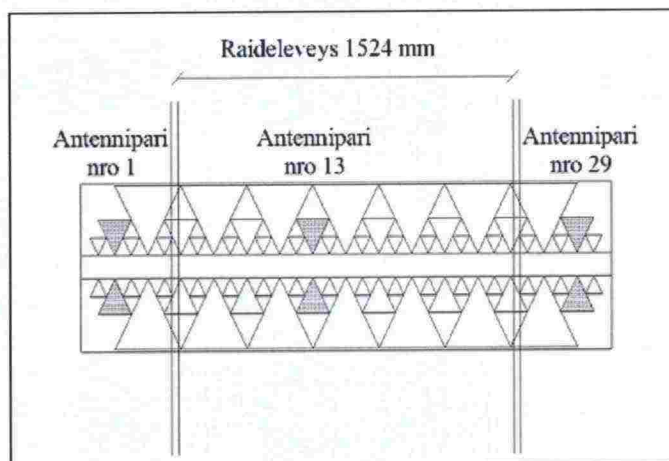
*Taulukko 6.3 Rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksien näytteiden hienoaineksille tehdyt lisämäärytykset WA<sub>24</sub> (PP = pölkyn pää(oikea reuna), RK = raiteen keskiliinja).*

| Näyte km<br>Tre–Ov<br>eteläraide | Hehkutus-<br>häviö (%) | Veden<br>adsorptio | WA <sub>24</sub><br>(*) | Näyte km<br>Jmk–Jy | Hehkutus-<br>häviö (%) | Veden<br>adsorptio | WA <sub>24</sub><br>(*) |
|----------------------------------|------------------------|--------------------|-------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|-------------------------|
| 195+075 PP                       | 5,1                    | 2,9                | 0,13                    | 328+120 PP         | 3,2                    | 3,0                | 0,11                    |
| 195+075 RK                       | 5,6                    | 3,0                |                         | 328+120 RK         | -                      | 2,7                |                         |
| 195+335 PP                       | 4,2                    | 2,7                | 0,11                    | 328+160 PP         | 2,6                    | 2,4                | 0,12                    |
| 195+455 PP                       | 4,2                    | 2,5                | 0,14                    | 328+180 PP         | -                      | 2,8                | 0,13                    |
| 195+770 PP                       | 4,0                    | 3,3                | 0,15                    | 328+240 PP         | 3,3                    | 2,8                | 0,13                    |
| 195+770 RK                       | 6,4                    | 3,6                |                         | 328+240 RK         | 2,8                    | 2,9                |                         |
| 195+900 PP                       | -                      | 3,1                | 0,14                    | 328+270 PP         | 3,8                    | 3,1                | 0,14                    |
| 196+180 PP                       | -                      | 2,9                | 0,11                    | 329+330 PP         | -                      | 1,7                | 0,11                    |
| 196+350 PP                       | 3,4                    | 2,4                | 0,16                    | 329+410 PP         | 2,1                    | 1,7                | 0,12                    |
| 196+350 RK                       | 5,0                    | 2,7                |                         | 329+410 RK         | 3,0                    | 2,2                |                         |
| 196+525 PP                       | 5,1                    | 2,5                | 0,14                    | 329+720 PP         | 2,6                    | 2,0                | 0,18                    |
| 196+630 PP                       | 4,2                    | 2,7                | 0,15                    | 329+780 PP         | -                      | 1,6                | 0,12                    |
| 196+865 PP                       | 4,4                    | 2,8                | 0,16                    | 329+920 PP         | 1,6                    | 1,6                | 0,15                    |
| 196+865 RK                       | 4,8                    | 1,9                |                         | 329+920 RK         | 1,5                    | 1,8                |                         |
| KA                               | 4,7                    | 2,8                | 0,14                    | KA                 | 2,6                    | 2,3                | 0,13                    |

\*) Karkeiden partikkelien vedenimu WA<sub>24</sub> vastaa koko poikkileikkauksen 4/31,5 mm kiviaineksen keskimääräistä arvoa

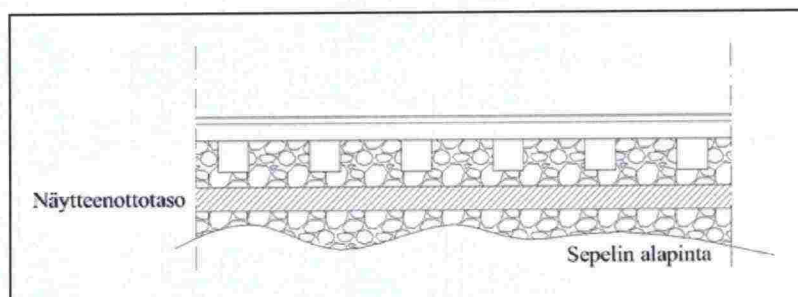
## 6.2.2 Maatutkamittausten havainnot

Rataosilla Kerava–Lahti ja Tampere–Jyväskylä tehdyissä maatutkamittauksissa käytettiin useita 3D-laitteiston antennipareja (ks. kuvat 5.10b ja 5.12b). Hienontuneisuusindeksi määritettiin kuitenkin vain näytteiden kohdilta valittujen kolmen antenniparin aineistosta (kuva 6.9). Indeksiluvut ovat tällöin mahdollisimman vertailukelpoisia näytetietojen kanssa, koska nämä antenniparit sijaitsevat näytepisteiden kohdalla. Lisäksi valitut antenniparit ovat ominaisuuksiltaan ja lähetystehoiltaan samankaltaisia, joten näillä antennipareilla saadut maatutka-aineistot ovat keskenään vertailukelpoisia. Antenniparit 1 ja 29 mittaavat pölkkyjen päissä ja antennipari 13 raiteen keskellä. Huomioitavaa on, että kiskojen läheisyys saattaa vaikuttaa antenniparien 1 ja 29 tuloksiin verrattuna raiteen keskeltä saatavaan aineistoon.



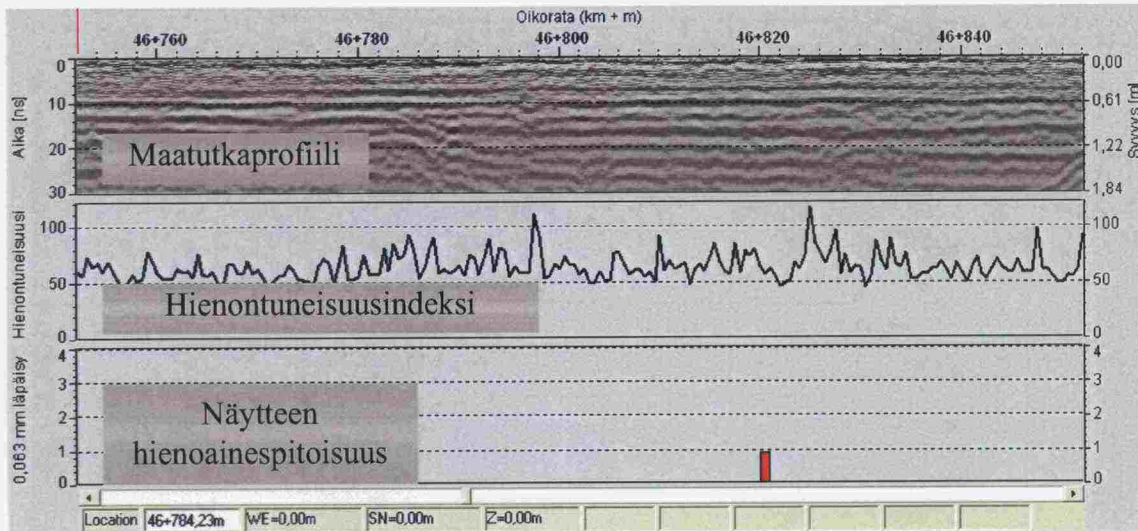
Kuva 6.9 Analyyseissä käytetyt 3D-antenniparit rataosuuksilla tehdyissä mittauksissa

Näytteenottotasona käytettiin Raidesepelin laadun tutkimusohjeen (Ratahallintokeskus, 1997) mukaista syvyystasoa kv - 300...400 mm. Jotta maatutka-aineisto ja näytteistä saadut tiedot olisivat keskenään mahdollisimman vertailukelpoisia, täytyy maatutkasignaalin taajuussisältöä tarkastella näytteenottotasoa vastaavalla syvyystasolla 4,5–7,5 ns (kv - 275...425 mm) (kuva 6.10). Hienontuneisuusindeksit on määritetty kyseiseltä syvyystasolta. Lisäksi vakiosyvyystasoa käytettäessä maatutkasignaalin vaimentuminen syvyyden suhteen on vakio.



Kuva 6.10 Maatutkasignaalin taajuussisällön laskentaan käytetty syvyystaso

Analyyseissä antennipareja käsiteltiin omina maatutkayksikköinä. Kuvassa 6.11 on esimerkki antenniparin 1 analyysinäkymästä Railway Doctor -ohjelmassa. Kuvassa ylimpänä on noin 100 metrin pituinen (km 46+750 – km 46+850) maatutkaprofiili Kerava–Lahti-oikoradalta pohjoisraiteelta pölkyn päästä. Kuvan keskellä on taajuuspinta-alan perustuva hienontuneisuusindeksi. Lisäksi kuvan alaosassa on esitetty pylväällä kilometriltä 46+820 haetun näytteen hienoainespitoisuus.

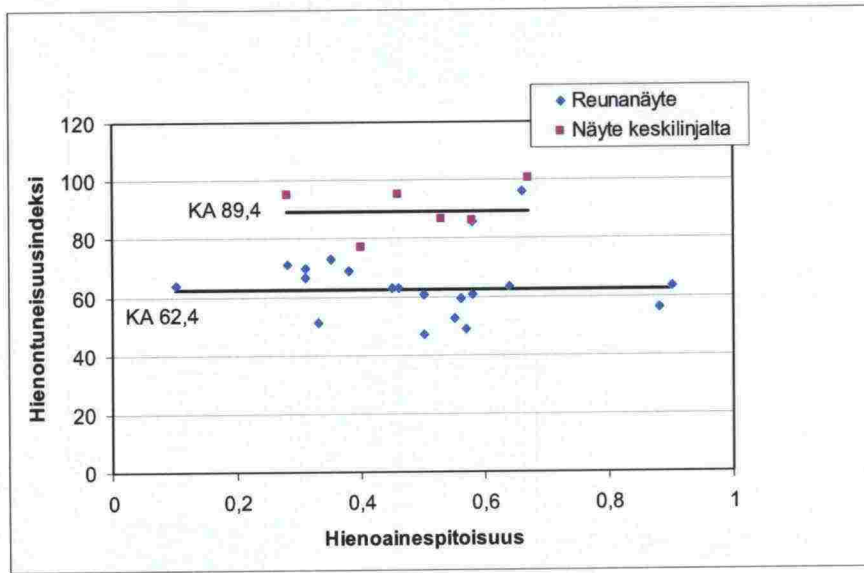


Kuva 6.11 *Railway Doctor -ohjelman analyysinäköymä Kerava-Lahti-oikoradalta. Kuvassa ylimpänä on maatutkaprofiili, keskellä signaalista mitattu hienontuneisuusindeksi ja alimpana referenssitietona näytteestä määritetty hienoainespitoisuus.*

Kuvan perusteella hienontuneisuusindeksi vaihtelee pääsääntöisesti välillä 50–70. Tuloksessa on kuitenkin nähtävillä melko suurta vaihtelua, koska indeksi on laskettu 0,5 metrin välein. Vaihtelua voidaan vähentää pidentämällä laskentaväliä. Pidempi laskentaväli voi kuitenkin aiheuttaa tuloksen vääristymistä. Toisaalta esimerkiksi vaihteet, sillat ja sähkökaapelit aiheuttavat indeksiin suuria paikallisia piikkejä, jolloin pidemmällä laskentavälillä näiden merkitys pienenee. Kuvassa olevan näytepisteen hienoainespitoisuus on 0,9, mikä edustaa hyvälaatuisen raidesepelin hienoainesmäärää.

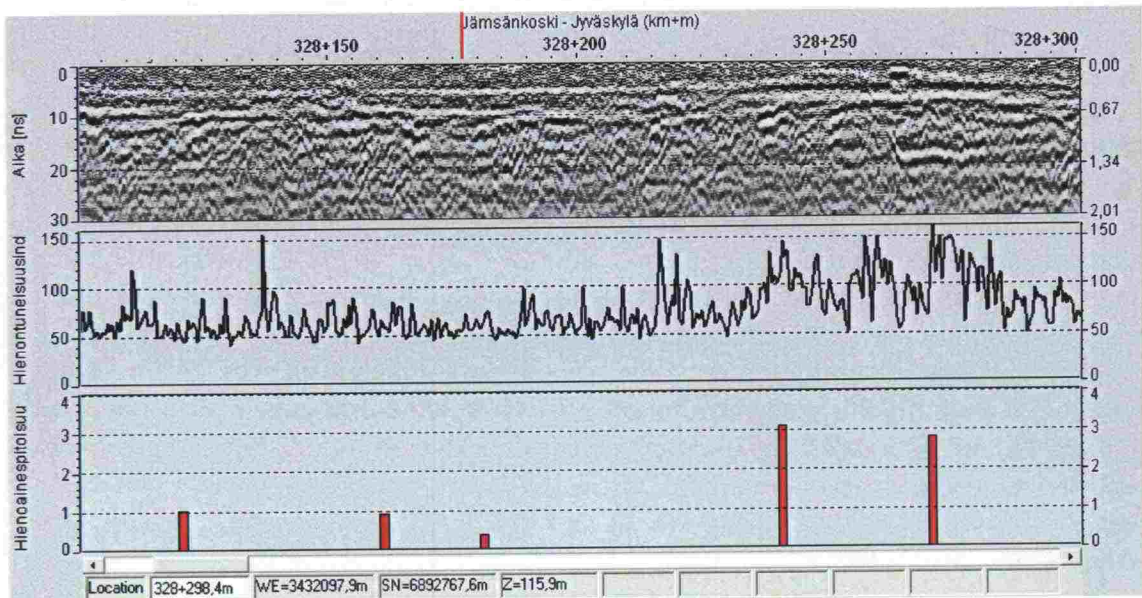
Tulosta voidaan tarkentaa, kun yhdistetään kaikki oikoradalta haettujen näytteiden hienoainespitoisuudet ja näitä vastaavat hienontuneisuusindeksit samaan kuvaajaan (kuva 6.12). Kuvassa siniset pisteet kuvaavat pölkkyjen päistä ja punaiset radan keskeltä otettujen näytteiden hienoainespitoisuuksia. Kaikkien näytteiden hienoainespitoisuudet ovat alle 1,0 prosenttia ja keskimääräinen hienoainespitoisuus 0,5 prosenttia. Kuvasta kuitenkin huomataan, että hienontuneisuusindeksit ovat huomattavasti suurempia raiteen keskellä (keskiarvo 89,4) kuin reunoilla (keskiarvo 62,4), vaikka näytteiden hienoainesmäärissä ei ole systemaattista eroa reunojen ja keskilinjan välillä. Tuloksen perusteella pölkkyjen päistä (antenniparit 1 ja 29) ja raiteen keskeltä (antennipari 13) saatavat aineistot eivät välttämättä ole täysin vertailukelpoisia keskenään. Tällöin reunoilta ja keskilinjalta saatavat tulokset olisi käsiteltävä erikseen. Kuvan perusteella voidaan kuitenkin todeta, että hienontuneisuusindeksin arvot 50–70 vastaavat hyvälaatuisen raidesepelin arvoja reunoilla.





Kuva 6.12 Kerava–Lahti-oikoradalta haettujen näytteiden hienoainespitoisuuksien ja hienontuneisuusindeksien vertailu.

Rataosan Tampere–Jyväskylä molemmille tutkimustapauksille tehtiin samanlaiset hienontuneisuusindeksitarkastelut kuin Kerava–Lahti-oikoradalla. Kuvassa 6.13 on esitetty 200 metrin pituinen analyysinäkömää antenniparilla 29 mitattuna tutkimustapaukselta km 328–330. Kuvasta huomataan selkeästi hienontuneisuusindeksin kasvu km 328+230 jälkeen, joten näytteiden km 328+240 ja 328+270 korkea hienoainespitoisuus havaitaan selkeästi myös indeksiluvun perusteella. Kuvan perusteella indeksin voidaankin todeta täsmäävän hyvin hienoainespitoisuuksien muutoksiin.



Kuva 6.13 Railway Doctor -ohjelman analyysinäkömää rataosalta Tampere–Jyväskylä. Kuvassa yllä on maatulka-profiili, keskellä signaalista mitattu hienontuneisuusindeksi ja alimpana referenssitietona näytteistä määritetyt hienoainespitoisuudet.

Oikoradan tuloksien mukaan hienontuneisuusindeksin arvot 50–70 kuvaavat reunoilla hyvälaatuisia raidesepeliä. Taulukossa 6.4 on vertailtu tutkimustapauksien km 195–197 ja km 328–330 reunanäytteiden hienoainespitoisuuksia hienontuneisuusindeksiin. Indeksien arvojen ollessa välillä 50–70 myös hienoainespitoisuudet ovat melko usein alle 1,0 prosenttia myös rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksissa.

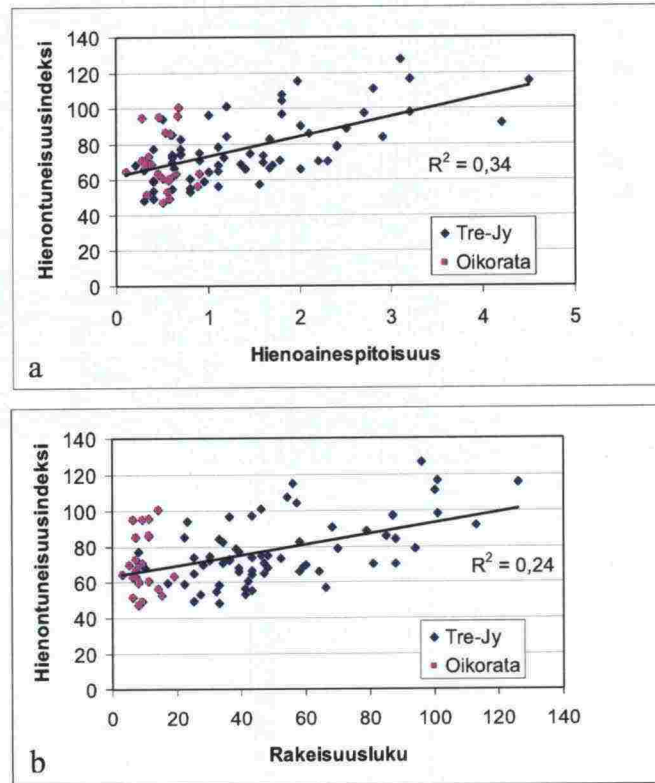
*Taulukko 6.4 Rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksien hienoainespitoisuuden ja hienontuneisuusindeksin vertailu reunoilta otetuille näytteille.*

| Kilometri  | Vasen reuna (antennipari 1) |                                 | Oikea reuna (antennipari 29) |                                 |
|------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
|            | 0,063 mm<br>läpäisy%        | Hienontuneisuus<br>-<br>indeksi | 0,063 mm<br>läpäisy%         | Hienontuneisuus<br>-<br>indeksi |
| km 196+865 | 0,95                        | 58,6                            | 2                            | 65,9                            |
| km 196+630 | 0,9                         | 70,7                            | 2,9                          | 84,1                            |
| km 196+525 | 1,45                        | 74,9                            | 0,8                          | 54,9                            |
| km 196+350 | 1,55                        | 57                              | 2,5                          | 88,9                            |
| km 196+180 | 2                           | 99,3                            | 0,4                          | 48,8                            |
| km 195+900 | 2,4                         | 79,1                            | 0,6                          | 54,6                            |
| km 195+770 | 2,3                         | 61                              | 0,7                          | 69,7                            |
| km 195+455 | 2,2                         | 70,5                            | 2,4                          | 78,7                            |
| km 195+335 | 0,3                         | 48                              | 0,8                          | 60,3                            |
| km 195+075 | 0,8                         | 52,9                            | 1,4                          | 65,7                            |
| km 328+120 | 0,6                         | 69,8                            | 1                            | 64,1                            |
| km 328+160 | 1,6                         | 69,8                            | 0,9                          | 75,3                            |
| km 328+180 | 0,7                         | 74,5                            | 0,4                          | 59                              |
| km 328+240 | 4,5                         | 115,7                           | 3,1                          | 127,3                           |
| km 328+270 | 3,2                         | 98,2                            | 2,8                          | 111,1                           |
| km 329+330 | 0,2                         | 68,3                            | 0,4                          | 59,4                            |
| km 329+410 | 0,6                         | 85,4                            | 0,7                          | 82,8                            |
| km 329+720 | 1,35                        | 68,5                            | 2,1                          | 86,2                            |
| km 329+780 | 0,6                         | 72,4                            | 0,3                          | 65,1                            |
| km 329+920 | 0,6                         | 66,2                            | 0,6                          | 73,1                            |
| 0 – 1,0    |                             | 50 – 70                         |                              |                                 |
| > 1,0      |                             | 70 –                            |                              |                                 |

### 6.2.3 Maatutkasignaalin taajuussisällön ja näytetietojen vertailu

Seuraavaksi esiteltävissä vertailuissa oletetaan, että maatutkasignaalin taajuussisältöön perustuvan hienontuneisuusindeksin ja näytetietojen riippuvuudet ovat lineaarisia. Vertailut aloitettiin tarkastelemalla hienontuneisuusindeksin riippuvuutta molemmilta rataosilta Kerava–Lahti ja Tampere–Jyväskylä haettujen (86 kpl) näytteiden rakeisuuksiin (kuva 6.14). Lisäksi vertailuissa oli mukana kolme aikaisemmin otettua näytettä rataosalta Tampere–Jyväskylä. Kuvassa 6.14a riippuvuutta tarkasteltiin raekooltaan alle 0,063 mm aineksen määrään ja kuvassa 6.14b rakeisuusluvun suhteen. Tuloksista huomataan, että hienoaineen määrällä on huomattavasti parempi selitysaste ( $R^2$ ) hienontuneisuusindeksiin kuin rakeisuusluvulla.



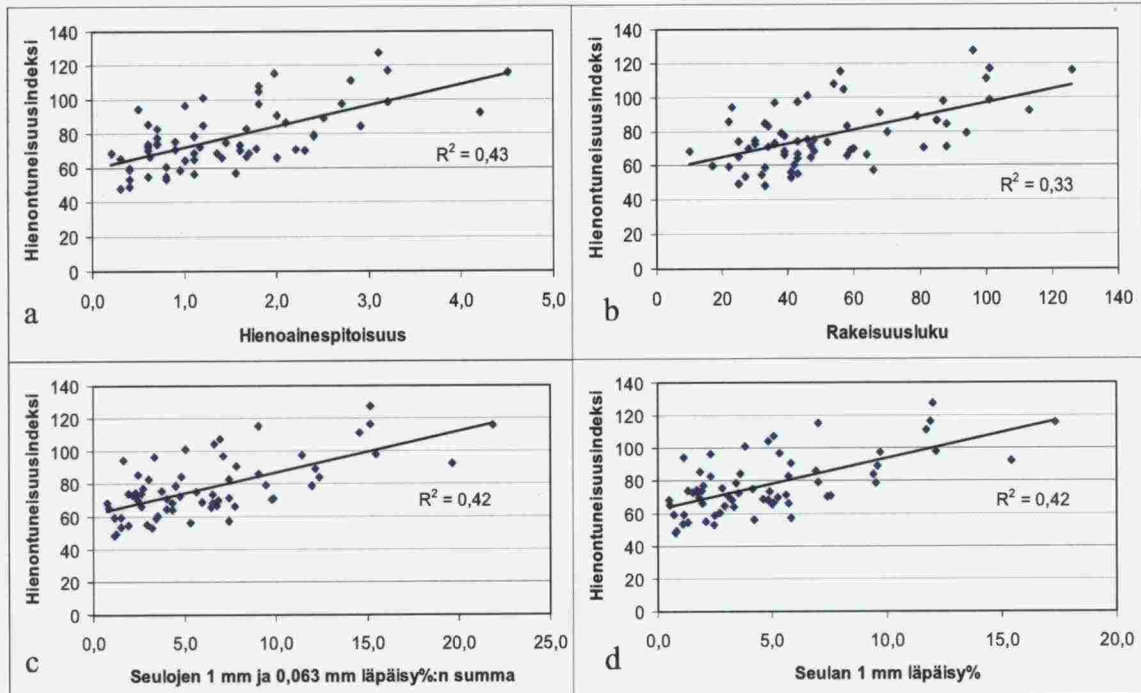


Kuva 6.14 Hienontuneisuusindeksin riippuvuus a) hienoainespitoisuudesta ja b) rakeisuusluvusta rataosilla Kerava–Lahti ja Tampere–Jyväskylä.

Vastaavia riippuvuustarkasteluja tehtiin myös ilman Kerava–Lahti-oikoradan näytteitä (kuva 6.15). Oikoratanäytteiden poisjättäminen hienontuneisuusindeksin riippuvuustarkasteluista on perusteltua, koska alhaisilla hienoainespitoisuuksilla hienontuneisuusindeksillä ei näyttäisi olevan juurikaan korrelaatiota hienoainespitoisuuteen (kuva 6.12).

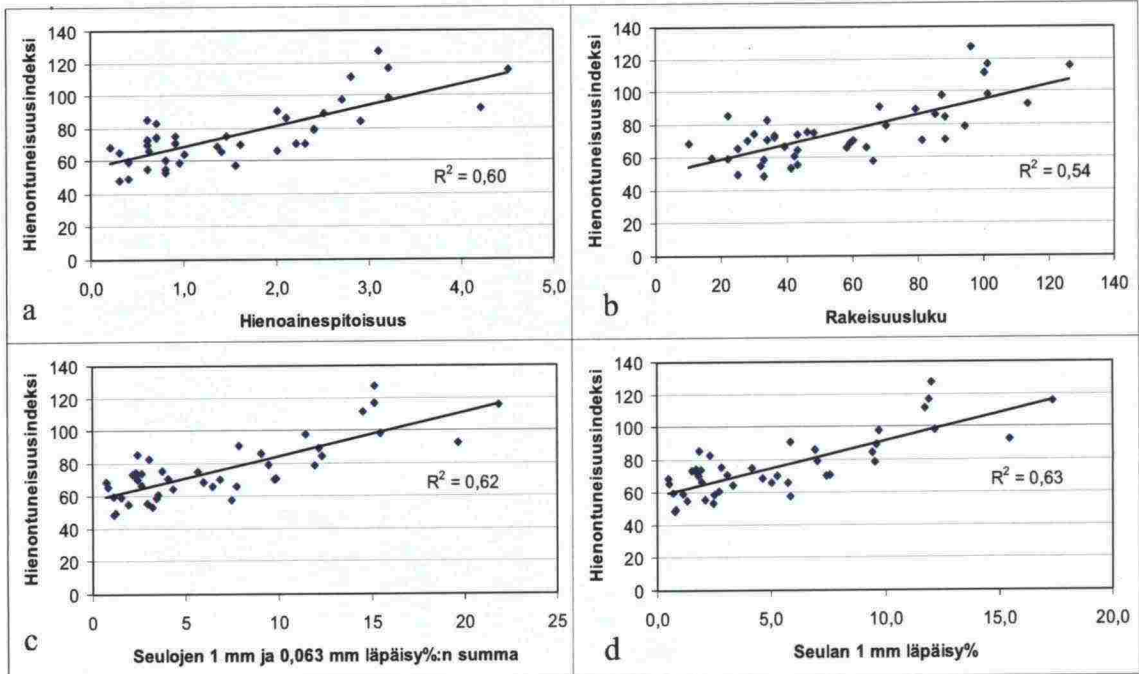
Kuvassa 6.15 hienontuneisuusindeksin riippuvuutta on tarkasteltu rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksien km 195–197 ja km 328–330 näytteiden hienoainespitoisuuteen, rakeisuuslukuun, 1 mm ja 0,063 mm seulojen läpäisyprosenttien summaan ja 1 mm seulan läpäisyprosenttiin. Paras selitysaste ( $R^2$ ) hienontuneisuusindeksille on edelleen hienoaineksen määrällä ( $R^2=0,43$ ), vaikkakin 1 mm ja 0,063 mm seulojen läpäisyprosenttien summalla ja 1 mm seulan läpäisyprosentilla on lähes yhtä hyvä korrelaatio. Rakeisuusluvulla on vastaavasti edelleen selkeästi muita huonompi selitysaste.





Kuva 6.15 Hienontuneisuusindeksin riippuvuus a) hienoainespitoisuudesta, b) rakeisuusluvusta, c) 1 mm ja 0,063 mm seulojen läpäisyprosenttien summasta ja d) 1 mm seulan läpäisyprosentista rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksilla.

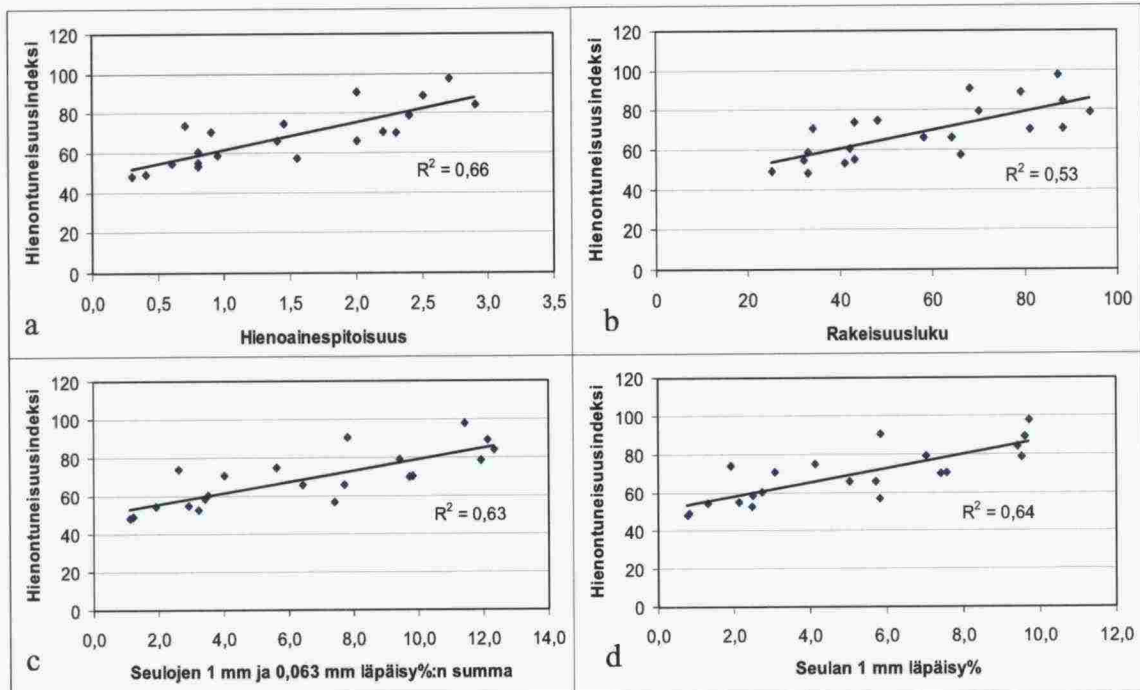
Ulkoiset tekijät, esimerkiksi kiskot, saattavat aiheuttaa pölkkyjen päistä mittaavien antenniparien aineistoihin eroja verrattuna raiteen keskeltä saatavaan aineistoon (vrt. kuva 6.9), koska kiskojen etäisyys reuna-antennipareihin on huomattavasti pienempi kuin keskilinjalla olevaan antennipariin. Kuvassa 6.16 hienontuneisuusindeksin riippuvuutta onkin tarkasteltu pelkästään rataosan Tampere–Jyväskylä reunanäytteille. Kuvasta huomataan, että selitysasteet parantuvat selvästi, kun tarkasteluissa ei ole huomioitu keskilinjalla näytteitä. Paras selitysaste ( $R^2 = 0,63$ ) on 1 mm seulan läpäisyprosentilla, joskaan selitysasteet hienoaineksen määrälle ja 1 mm ja 0,063 mm seulojen läpäisyprosenttien summalle eivät ole paljon huonompia. Rakeisuusluvun nähdään edelleen korreloivan kaikista heikoimmin hienontuneisuusindeksiin.



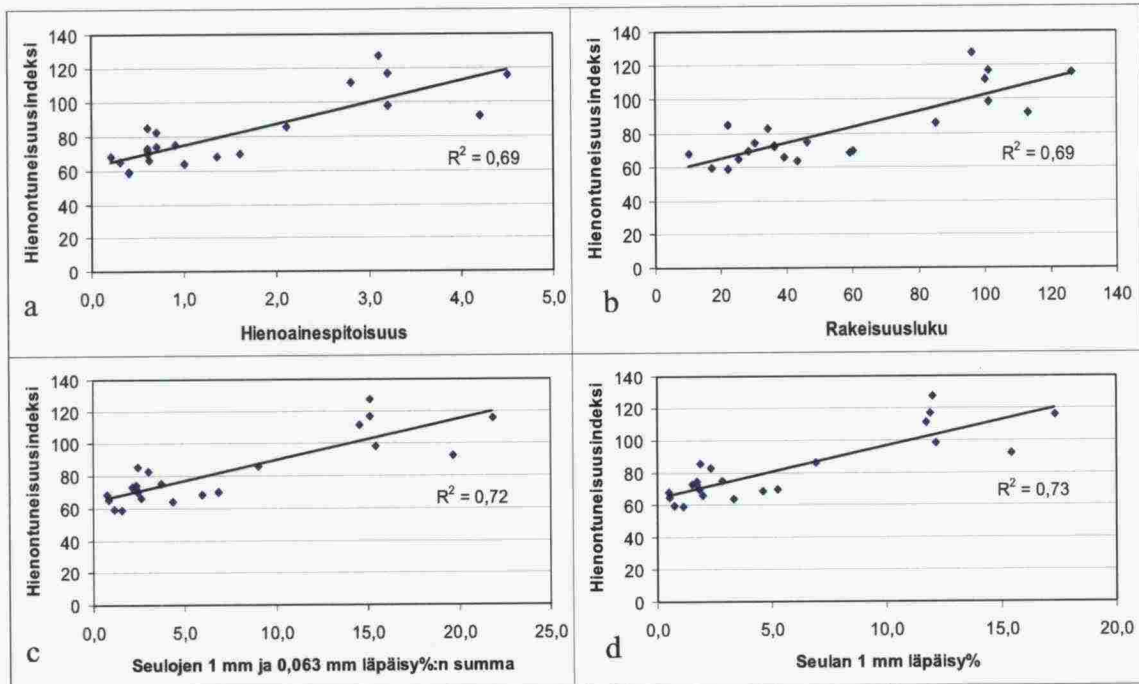
Kuva 6.16 Hienontuneisuusindeksin riippuvuus rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksien reunanäytteiden a) hienoainespitoisuudesta, b) rakeisuusluvusta, c) 1 mm ja 0,063 mm seulojen läpäisyprosenttien summasta ja d) 1 mm seulan läpäisyprosentista.

Riippuvuustarkasteluja tarkennettiin tekemällä vertailut erikseen molemmille rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksien pölkkyjen päistä otetuille reunanäytteille (kuvat 6.17 ja 6.18). Tällainen tarkastelu antaa parhaan mahdollisen lähtökohdan näytteistä määritettyjen rakeisuutta kuvaavien tunnuslukujen ja signaalin taajuussisällön vertailulle, koska jakaessa rataosan tutkimustapaukset omiksi tarkastelujoukoiksi, rakenteelliset ja kiviaineksen laadulliset erot voidaan minimoida.

Tutkimustapauksella km 195–197 hienoaineksen määrällä on paras selitysaste ( $R^2 = 0,66$ ) (kuva 6.17a). Selitysasteet 1 mm ja 0,063 mm seulojen läpäisyprosenttien summalle ( $R^2 = 0,63$ ) (kuva 6.17c) ja 1 mm seulan läpäisyprosentin summalle ( $R^2 = 0,64$ ) (kuva 6.17d) ovat samaa luokkaa. Tutkimustapauksen km 328–330 selitysasteet ovat jokseenkin parempia kuin km 195–197 selitysasteet (kuva 6.18). Paras selitysaste saadaan 1 mm seulan läpäisyprosentille ( $R^2 = 0,73$ ) (kuva 6.18d). Tutkimustapauksella km 328–330 on kuitenkin muutama erittäin hienontunut näyte, joiden vaikutus selitysasteisiin on huomattava. Esimerkiksi suurimman hienoainespitoisuuden omaavan pisteen poistaminen heikentäisi selitystasetta 0,04 verran.



Kuva 6.17 Hienontuneisuusindeksin riippuvuus rataosan Tampere–Jyväskylä km 195–197 reunanäytteiden a) hienoainespitoisuudesta, b) rakeisuusluvusta, c) 1 mm ja 0,063 mm seulojen läpäisyprosenttien summasta ja d) 1 mm seulan läpäisyprosentista.

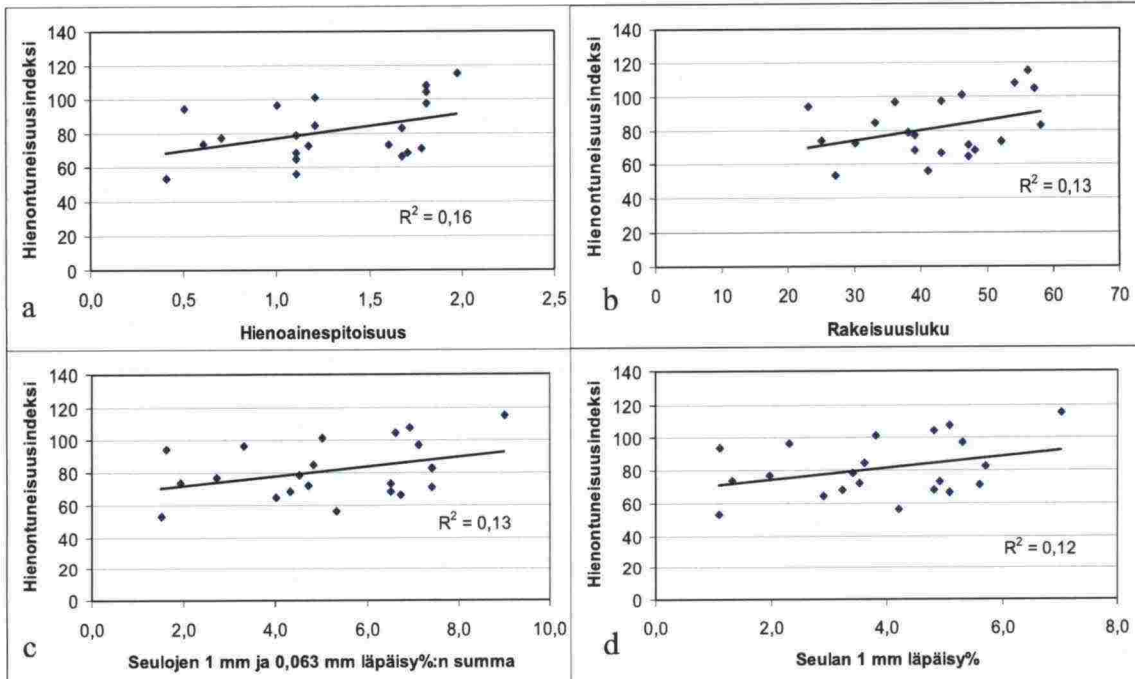


Kuva 6.18 Hienontuneisuusindeksin riippuvuus rataosan Tampere–Jyväskylä km 328–330 reunanäytteiden a) hienoainespitoisuudesta, b) rakeisuusluvusta, c) 1 mm ja 0,063 mm seulojen läpäisyprosenttien summasta ja d) 1 mm seulan läpäisyprosentista.

Tarkastelut tehtiin myös molempien tutkimustapauksien keskilinjan näytteille (kuva 6.19). Selitysasteet jäivät huomattavasti reunanäytteiden vastaavia arvoja

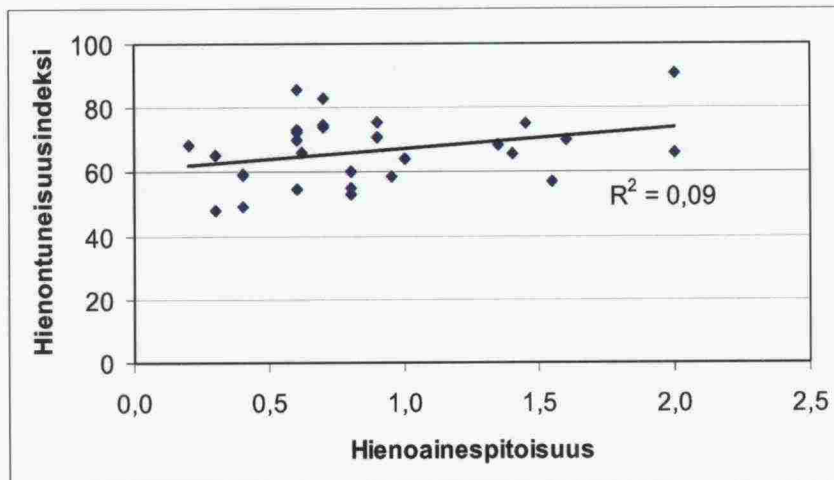


alhaisemmaksi. Paras selitysaste on hienoaineksen määrällä (0,16) (kuva 6.19a). Huonoihin korrelaatioihin vaikuttaa suuresti se, että keskilinjänäytteissä ei ole suuria hienoainespitoisuuksia (yli 2,0 %), jotka taas vastaavasti reunanäytteissä vaikuttavat oleellisesti hyviin selitysasteisiin.



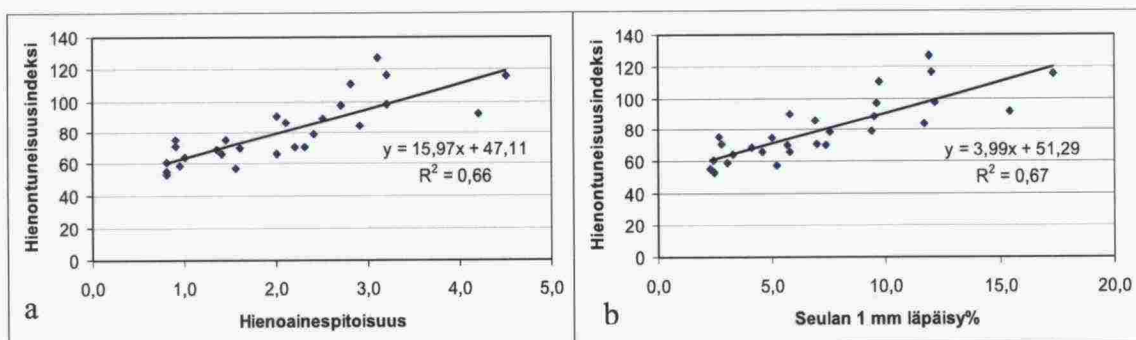
Kuva 6.19 Hienontuneisuusindeksin riippuvuus rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksien keskilinjanaytteiden a) hienoainespitoisuudesta, b) rakeisuusluvusta, c) 1 mm ja 0,063 mm seulojen läpäisyprosenttien summasta ja d) 1 mm seulan läpäisyprosentista.

Tuloksesta voidaan myös päätellä, että maatutkasignaalin perusteella ei saada kunnollista korrelaatiota alhaisten hienoainespitoisuuksien välille. Tämä nähdään kuvasta 6.20, jossa on esitetty hienontuneisuusindeksin riippuvuutta rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksien reunanäytteiden hienoainespitoisuudesta, kun niistä on poistettu korkeat yli 2,0 läpäisyprosentin hienoainespitoisuushavainnot.



Kuva 6.20 Hienontuneisuusindeksin riippuvuus rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksien reunanäytteiden hienoainespitoisuudesta, kun mukana ei ole yli 2,0 läpäisyprosentin arvoja.

Alhaisten hienoainespitoisuuksien vaikutusta korrelaatioihin rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksien reunanäytteissä on tutkittu kuvassa 6.21. Kuvassa 6.21a on esitetty hienontuneisuusindeksin riippuvuus hienoaineksen määrästä lajitteen määrän ollessa yli 0,7 %. Saatu selitysaste ( $R^2 = 0,66$ ) on parempi verrattuna kuvan 6.16a arvoon ( $R^2 = 0,60$ ), jossa mukana on kaikki hienoainespitoisuudet. Selitysasteen nousu todetaan myös kuvasta 6.21b, missä tarkasteltiin hienontuneisuusindeksin riippuvuutta 1 mm seulan läpäisyprosentista lajitteen määrän ollessa yli 2,0 %. Tällöin selitysasteeksi saatiin 0,67, kun vastaava arvo oli 0,63 kaikki läpäisyprosentit huomioiden (kuva 6.16d).



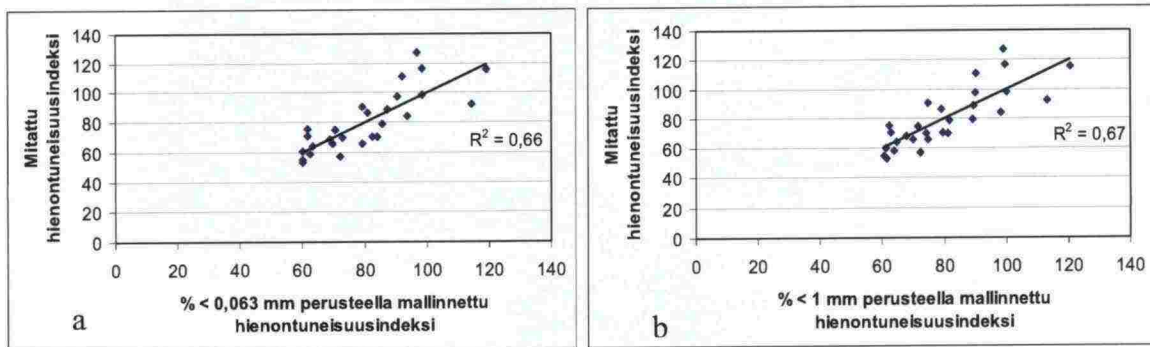
Kuva 6.21 Hienontuneisuusindeksin riippuvuus a) hienoainespitoisuudesta läpäisyprosentin ollessa yli 0,7 ja b) seulan 1 mm läpäisyprosentista läpäisyprosentin ollessa yli 2,0 rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksien reunanäytteillä.

Hienoaineksen määrän ollessa yli 0,7 ja 1 mm seulan läpäisyprosentin ollessa yli 2,0 hienontuneisuusindeksi voidaan hienoaineksen määrän ja 1 mm seulan läpäisyprosentin perusteella mallintaa kaavoilla 6-1 ja 6-2.

$$\text{H.indeksi} = 15,97 \times (\% < 0,063 \text{ mm}) + 47,11 \quad (\text{kun läpäisy} > 0,7) \quad (R^2=0,66) \quad (6-1)$$

$$\text{H.indeksi} = 3,99 \times (\% < 1 \text{ mm}) + 51,29 \quad (\text{kun läpäisy}\% > 2,0) \quad (R^2=0,67) \quad (6-2)$$

Kuvassa 6.22 on esitetty mitattujen ja kaavoilla 6-1 ja 6-2 mallinnettujen hienontuneisuusindeksien yhteydet.



Kuva 6.22 Mitattujen ja yhtälöillä 6-1 ja 6-2 mallinnetun hienontuneisuusindeksin selityssasteet a) hienoainespitoisuuden ja b) 1 mm seulan läpäisyprosentin perusteella.

Edellä esitetyt yhtälöt ja selityssasteet on todettu vain kyseessä olevissa kohteissa ja näiden kiviaineksessa, joten tuloksia ei voi yleistää koskemaan kaikkia rataosia. Lisäksi korrelaatioihin vaikuttavat todennäköisesti osaltaan myös kiviaineksen muut ominaisuudet.

#### 6.2.4 Hienoaineksen laadun vaikutus maatutkasignaalin taajuussisältöön

Luvussa 6.2.3 löydetty korrelaatiotulokset hienoaineksen määrälle ja 1 mm seulan läpäisyprosentin summalle on saatu huomioimatta hienoaineksen laatua. Seuraavassa tarkastellaan hienoaineksen laadun vaikutusta hienontuneisuusindeksin korrelaatioihin. Tarkasteluissa ovat mukana rataosilta Tampere–Jyväskylä ja Kerava–Lahti otetut reuna-näytteet, joille tehtiin hienoaineksen laadun määrittäviä. Tarkastelujoukossa oli siten 24 kohdetta, eli merkittävästi vähemmän kuin edellisessä luvussa 6.2.3 esitetyissä tarkasteluissa. Hienoaineksen laadun vaikutuksen tarkastelut tehtiin askeltavan lineaarisen regressioanalyysin avulla.

Taulukossa 6.5 on esitetty hienontuneisuusindeksin riippuvuutta raekooltaan alle 0,02 mm aineksen pitoisuuden, hienoaimespitoisuuden, 1 mm seulan läpäisyprosentin ja rakeisuusluvun suhteen kyseisessä 24 kohteen tarkastelujoukossa. Tässä joukossa paras selityssaste saadaan 1 mm seulan läpäisyprosentille ( $R^2 = 0,71$ ). Kaikkien tulokset ovat tilastollisesti erittäin merkitseviä ( $P < 0,001$ ).



*Taulukko 6.5 Hienontuneisuusindeksin riippuvuus näytteistä määritettyihin rakeisuuden tunnuslukuihin (N = 24 kpl).*

|               | R <sup>2</sup> | P      |
|---------------|----------------|--------|
| < 0,02 mm     | 0,60           | <0,001 |
| < 0,063 mm    | 0,65           | <0,001 |
| < 1 mm        | 0,71           | <0,001 |
| Rakeisuusluku | 0,65           | <0,001 |

Regressionanalyysin tulos on esitetty taulukossa 6.6. Tuloksen mukaan hienoaineksen ominaisuuksien perusteella hienontuneisuusindeksin selityssasteita voitiin hieman parantaa verrattuna pelkästään lajitteiden <0,02 mm, <0,063 mm, ja <1,0 mm pitoisuuden tai rakeisuusluvun perusteella tehtyihin tarkasteluihin (vrt. taulukko 6.5). Varsinkin hienoaineksen veden adsorptiolla näyttäisi olevan tuloksia lievästi parantava vaikutus. Pelkästään lajitteen (<1,0 mm) määrän perusteella saatu paras selityssaste (0,71) saatiin veden adsorption mukanaololla parantumaan arvoon 0,75, jota voidaan pitää parhaana hienontuneisuusindeksiä kuvaavana korrelaationa. Samaan selityssasteeseen (0,75) päästiin lajitteen (< 1,0 mm) ja humuspitoisuuden perusteella, mutta tulosta heikentää pienempi aineisto (N=17) verrattuna veden adsorptioon (N=24).

Hienoaineksen määrällä ja rakeisuusluvulla on hyvin samansuuruiset selityssasteet, mutta luvussa 6.2.3 esitettyjen tuloksien perusteella hienoaineksen määrää voidaan pitää parempana hienontuneisuusindeksiä kuvaavana tekijänä. Taulukosta nähdään vielä, että karkeiden rakeiden vedenimulla ei ole juurikaan parantavaa vaikutusta hienontuneisuusindeksin kuvattavuuteen.

*Taulukko 6.6 Hienontuneisuusindeksin selityssasteet (R<sup>2</sup>), kun selittävinä muuttujina ovat rakeisuuden tunnuslukujen lisäksi hienoaineksesta määritetyt laadulliset tekijät ja karkeiden rakeiden vedenimu. Kaikilla selityssasteilla P < 0,001.*

|               | Veden<br>adsorptio | Humuspitoisuus | 4/31,5 mm<br>vedenimu |
|---------------|--------------------|----------------|-----------------------|
| < 0,02 mm     | 0,62               | 0,59           | 0,57                  |
| < 0,063 mm    | 0,68               | 0,66           | 0,63                  |
| < 1 mm        | 0,75               | 0,75           | 0,74                  |
| Rakeisuusluku | 0,68               | 0,72           | 0,63                  |
|               | N = 24             | N = 17         | N = 20                |

Askeltavan regressioanalyysin tulosta ei voi suoraan verrata aiemmassa luvussa saatuihin tuloksiin, koska regressioanalyysissä aineiston koko oli suhteellisen pieni (N=24). Esimerkiksi tutkimustapauksien km 195–197 ja 328–330 reunanäytteiden ja aiemmin otettujen näytteiden (yhteensä N=43) perusteella määritetyt selityssasteet olivat välillä 0,54–0,63. Mikäli tarkasteluihin ei otettu mukaan alhaisia läpäisyprosentteja, selityssasteet olivat hienoainespitoisuudelle 0,66 (N=28) ja 1 mm seulan läpäisyprosentille 0,67 (N=29) (kuva 6.21).

Hienoaineksen veden adsorption lievä tuloksia parantava vaikutus oli osaltaan odotettua. On kuitenkin huomioitava, että kiviaineksen laadullisten ominaisuuksien

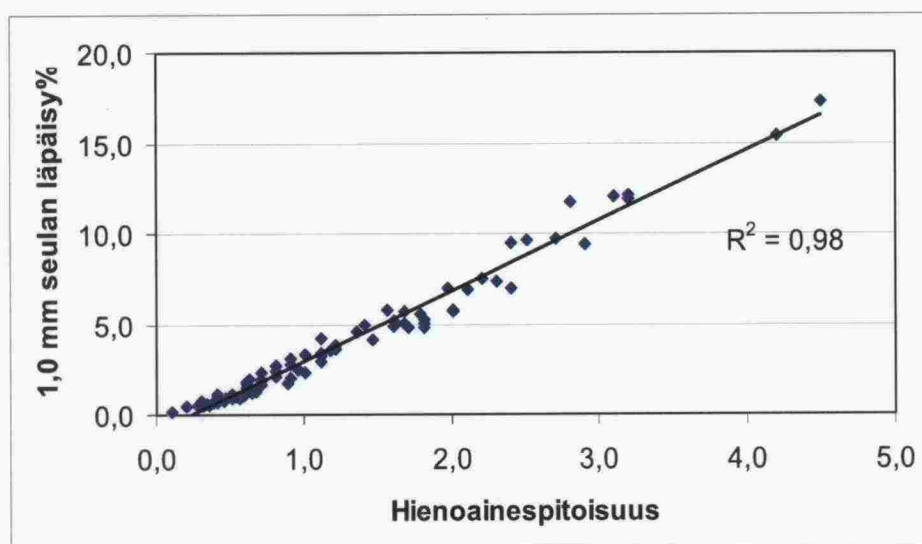
vaikutus korrelaatioihin ei tässä tarkastelussa tullut järkevästi esiin, koska lähtökiviaines oli samaa. Hienoaineksen laadun vaikutus onkin todennäköisesti suurempi, jos tarkasteluissa on eri lähtökiviaineita. Tässä työssä saatu tulos kuitenkin viittaa siihen, että hienoaineksen laatu on syytä huomioida jatkotutkimuksissa.

Toisaalta tässä työssä tehdyt tarkastelut antavat parhaan mahdollisen lähtökohdan pelkän hienoainesmäärän ja maatutkasignaalin taajuussisällön väliseen korrelaatioon, koska muut esimerkiksi kiviaineksen laadulliset erot on minimoitu. Tätä ilmentää se, että rataosan Tampere–Jyväskylä reunanäytteiden yhteys (vrt. kuva 6.16) hienontuneisuusindeksiin parani, kun näytteet jaettiin tutkimustapauskohtaisesti (vrt. kuvat 6.17 ja 6.18).

## 7 PÄATELMÄT JA JATKOTUTKIMUKSET

### 7.1 Raidesepelin hienontuneisuuden arviointi

Teorian perusteella voitiin olettaa, että maatutkasignaalin taajuussisältöön ja korkeiden taajuuksien vaimentumiseen vaikuttaa voimakkaimmin materiaalin hienoaineksen määrä. Tutkimustulosten perusteella 1 mm seulan läpäisyprosentti korreloi hienontuneisuusindeksin kanssa ehkä jopa paremmin kuin hienoainespitoisuus. Tulos selittyy osaltaan kuvan 7.1 perusteella. Tutkituilla rataosilla raekooltaan alle 0,063 mm olevan hienoaineksen ja alle 1,0 mm lajitteen pitoisuuden yhteys on erittäin selkeä, koska tarkasteltujen lähtökiviainesten määrä oli hyvin rajallinen. Tämän perusteella hienontuneisuusindeksin referenssitietona on mahdollista käyttää 1 mm seulan läpäisyprosenttia. Lisäksi alle 1,0 mm lajitteen pitoisuuden selvittäminen on helpompaa kuin hienoainespitoisuuden johtuen yksinkertaisemmasta seulonnasta.



Kuva 7.1 Hienoainespitoisuuden yhteys 1,0 mm seulan läpäisyprosenttiin tarkastelluissa näytteissä.

On kuitenkin huomioitava, että hienoaineksen määrä raekooltaan alle 1,0 mm lajitteessa riippuu jossain määrin kivilajista, varsinkin mineralogiasta. Pehmeät, mutta sitkeät kivilajit voivat hajotessaan kasvattaa hienoaineksen määrää 1,0 mm seulan läpäisyprosentin juurikaan kasvamatta. Vastaavasti kova, mutta hauras kivilaji voi hajota alle 1,0 mm lajitteeksi kuitenkin merkittävästi lisäämättä hienoainesta. Tässä työssä saavutetut tulokset pätevät lähinnä rataosan Tampere–Jyväskylä ja jossain määrin myös Kerava–Lahti raidesepelikiviaineksissa. Jatkotutkimuksissa onkin syytä selvittää kiviaineksen laadun vaikutusta maatutkasignaalin taajuussisältöön.

### 7.2 Raidesepelin laadun luokittelu maatutkasignaalin taajuussisällön perusteella

Maatutkasignaalin taajuussisältöön perustuva raidesepelin laadun luokittelu pohjautuu rataosilta Tampere–Jyväskylä ja Kerava–Lahti haettujen reunanäytteiden rakeisuustietojen ja näiltä kohdin saadun maatutka-aineiston vertailuun. Tällöin esitettävää raidesepelin laatuluokittelua voidaan soveltaa vain raiteen reunoille. Raiteen keskilinjalla olevan raidesepelin jättäminen pois luokittelusta perustuu keskilinjalta saatujen rakeisuustietojen ja maatutka-aineiston huonoon vertailtavuuteen (vrt. kuva 6.19).

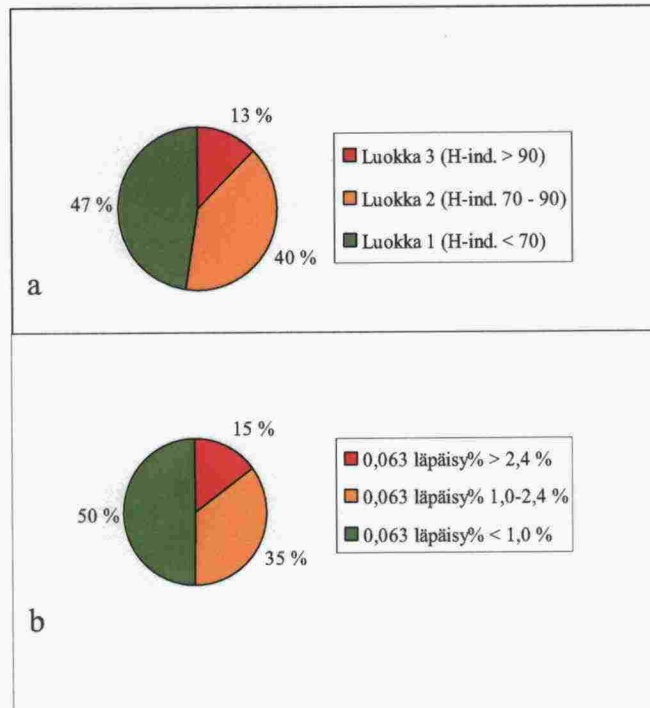


Hienontuneisuusindeksin riippuvuus tutkimustapauksien km 195–197 ja 328–330 näytteiden hienoainespitoisuuksista on huomattavasti heikompi ( $R^2 = 0,42$ ) (kuva 6.15a), kuin mitä se on ilman keskilinjänäytteitä ( $R^2 = 0,60$ ) (kuva 6.16a).

Raidesepelille esitetään maatutkaukseen perustuvaa kolmiportaista laatuluokitusta, jossa luokat määritetään hienontuneisuusindeksin perusteella. Laatuluokkaan 1 kuuluu hienontumaton, hyvä raidesepeli. Luokan 1 raidesepeliä voidaan verrata raidesepeliin, jonka hienoainesmäärä on enintään noin 1,0 %. Luokkaan 3 vastaavasti kuuluu voimakkaasti hienontunut raidesepeli, jonka hienoainesmäärä on vähintään noin 2,5 %. Tutkimustapauksien km 195–197 ja 328–330 perusteella 2,5 % hienoainesmäärä vastaa suunnilleen rakeisuuslukua 80. Luokka 2 käsittää näiden väliin jäävän tyydyttävässä kunnossa olevan raidesepelin, jossa hienontumista on jo selvästi tapahtunut.

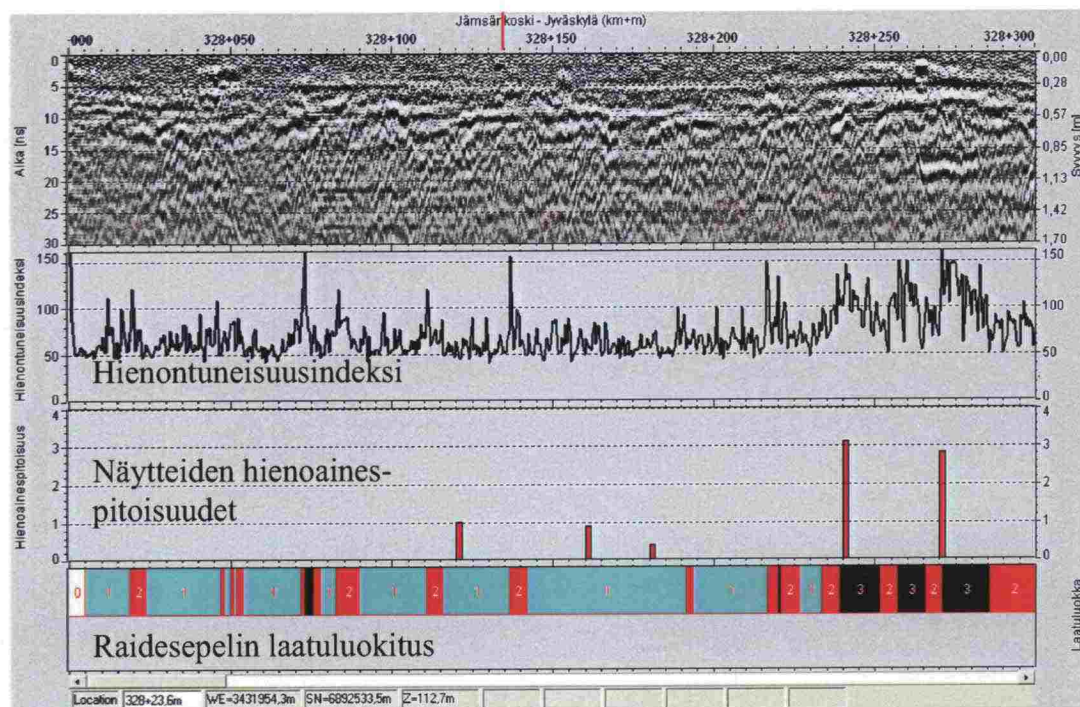
Luokan 1 hienontuneisuusindeksin ylärajan arvoksi määritetään 70, mikä perustuu oikoradalta haettuihin näytteisiin. Lähes kaikkien reunanäytteiden hienontuneisuusindeksin arvo vastaa tällöin luokkaa 1 keskiarvon ollessa 62,4 (vrt. kuva 6.12). Vastaavasti luokan 3 alarajan arvoksi määritetään rataosan Tampere–Jyväskylä tutkimustapauksien hienontuneiden näytteiden perusteella luku 90. Luokkaan 2 kuuluu tällöin raidesepeli, jonka hienontuneisuusindeksi on välillä 70–90. Edellä esitetty laatuluokitus on alustava, koska tarkasteluissa oli mukana vain yhden rataosan kiviainesta. Luokitusta on syytä tarkentaa ja toimivuutta verifioida näytteenoton avulla. Lisäksi laatuluokitusta on syytä käyttää jollekin tietylle, esimerkiksi 100 metrin matkalle laskettuna keskiarvona.

Kuvassa 7.2a tutkimustapauksien km 195–197 ja km 328–330 reunanäytteet on jaettu edellä esitettyihin laatuluokkiin. Kuvan perusteella 47 % näytteistä sijoittuu luokkaan 1 ja 13 % luokkaan 3. Kuvassa 7.2b näytteet ovat vastaavasti jaettu hienoainesmäärän perusteella kolmeen luokkaan (<1,0 %, 1,0 – 2,4 % ja >2,4 %). Kuvista a ja b voidaan todeta, että laatuluokkien ja hienoainesmäärien prosenttiosuudet vastaavat hyvin toisiaan.



Kuva 7.2 Tutkimustapauksien km 195–197 ja km 328–330 reunanäytteiden (40 kpl) sijoittuminen a) laatuiluokkiin ja niiden b) hienoainesmäärät.

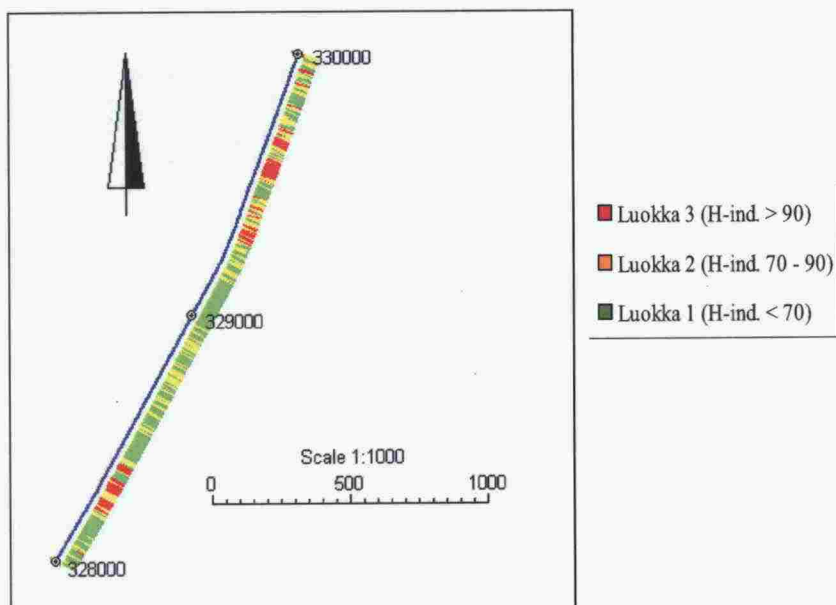
Laatuluokitukseen perustuvaa raidesepelin hienontuneisuutta voidaan selvittää kätevästi Railway Doctor -ohjelmalla. Kuvassa 7.3 on esimerkki Railway Doctor -ohjelman analyysinäkymästä. Näkymässä ylimpänä on maatutkaprofiili, keskellä laskettu hienontuneisuusindeksi ja näytteistä määritetyt hienoainespitoisuudet sekä alimpana hienontuneisuusindeksin perusteella määritetty raidesepelin laatuluokitus. Ohjelmalla voidaan helposti paikantaa pahoin hienontuneet rataosuudet. Ohjelman avulla ratalinjat voidaan myös luokitella edellä mainitun laatuluokituksen perusteella, esimerkiksi 100 metrin osuuksille lasketuilla keskiarvoilla. Kuvan 7.3 laatuluokitus on laskettu viiden metrin liukuvalla keskiarvolla.



Kuva 7.3 *Railway doctor -ohjelman analyysinäköymä. Kuvassa on ylimpänä maatutkaprofili, keskellä hienontuneisuusindeksi ja näytteistä määritetyt hienoainespitoisuudet ja alimpana indeksistä määritetty raidesepelin laatuluokka.*

Laatuluokitusta voidaan esittää visuaalisemmin suoraan ratalinjalla Railway Doctor -ohjelman karttanäkymässä (kuva 7.4). Kuvassa on esitetty oikealta reunalta pölkyn päästä määritetyn raidesepelin laatuluokitus tutkimustapauksella km 328–330. Samaan kuvaan voidaan lisätä myös vasemman reunan laatuluokitus, jolloin raidesepelin laatua voidaan arvioida myös radan poikkisuunnassa.





Kuva 7.4 *Railway doctor -ohjelman karttanäkymä. Näkymässä on esitetty kohteen km 328–330 oikealta reunalta pölkyn päästä määritetty raidesepelin laatuluokitus.*

### 7.3 Jatkotutkimusehdotukset

Tähän työhön liittyen mittauksia tehtiin vain kahdella rataosalla, Tampere–Jyväskylä ja Kerava–Lahti. Tämän johdosta on huomioitava, että saadut tulokset vastaavat näiden rataosien kiviainesta. Tulevaisuudessa on syytä tutkia mineralogialtaan erilaisten kiviainesten vaikutusta maatumkasignaaliin tekemällä vertailumittauksia eri rataosilla ja tarkastelemalla samalla tukikerrosmateriaalin laatua referenssitutkimuksin.

Talven vaikutusta raidesepelimitauksiin olisi myös syytä arvioida. Raidesepelimitaukset tehdään yleensä kesäaikaan tukikerroksen ollessa sulana veden ollessa sitoutuneena rakenteessa olevaan hienorakeiseen ainekseen. Vastaavasti talvella tukikerroksessa oleva vesi on jäätyneenä hienompien rakeiden ympärillä, jolloin rakenne on homogeenisempi. Tästä johtuen rakenteen rajapintamittaukset tehdään normaalisti talvella. Mikäli raidesepelin laadun mittaukset eivät ole riippuvaisia vuodenajasta, talvi- ja kesämittauksia olisi mahdollista yhdistää.

Jatkossa olisi myös syytä tutkia maatumkan käyttämistä raidesepelin laadun seurannan välineenä tietyllä aikasyklillä tehtävillä mittauksilla. Menetelmänä tämä olisi erittäin käytännöllistä nopeasti saatavan aineiston ja helposti suoritettavien vertailujen takia. Taajuussisällössä tapahtuvat muutokset olisi helposti nähtävissä ja raidesepelissä tapahtuneet muutokset on helppo tulkita tuloksien perusteella. Samalla olisi mahdollista tutkia myös sääolojen, lähinnä sateiden ja pitkien kuivien jaksojen vaikutusta signaalin taajuussisältöön. Lisäksi maatumka-aineiston ja ratageometria-aineiston keskinäistä vertailua on syytä kehittää radassa olevien ongelmakohtien syiden selvittämisen tehostamiseksi.

Parempaan raiteen keskellä olevan raidesepelin laadun tunnistamiseen on syytä pyrkiä. Menetelmään tulisi tällöin lisäarvoa, koska raidesepelin laadun vaihtelut radan poikkisuunnassa vaikuttavat esimerkiksi ratapölkyn kestoikään.

Maatutkasignaalin taajuussisällön tutkimusta on syytä jatkaa. Signaalia käsittelemällä ja jatkoprosessoimalla on todennäköisesti mahdollista saada vieläkin parempia korrelaatioita referenssiparametrien ja hienontuneisuusindeksin välille. Lisäksi erilaisten taajuusalueiden analysointia ja mittaustiheyksien vertailuja on edelleen syytä jatkaa.

Tähän työhön liittyvissä 3D-maatutkamittauksissa käytettiin vain yhtä 3D-antennia, joten eri antennien keskinäistä vertailua ei voitu tehdä. Jatkossa olisikin syytä pohtia mahdollisia kalibrointimenetelmiä eri antennien välillä.

## LÄHTEET

3d-radar As. (2006). Opening a new dimension for Ground Penetrating Radar. Esite.

Banverket [www]. (Luettu 18.4.2007). Saatavissa:

<http://banverket.se/upload/pdf/industridivisionen/entreprenad/Markundersokning.pdf>.

Carpenter, D., Jackson, P.J., Jay, A.(2003). Enhancement of the GPR method of railway trackbed investigation by the installation of radar detectable geosynthetics. NDT&E International 37. (2004) s. 95-103

Clark, M.R., Gillespie, R., Kemp, T., McCann, D.M., Forde, M.C. (2001). Electromagnetic properties of railway ballast. NDT&E International 34 (2001) s. 305-311.

Clark, M.R., Gordon, M., Giannopoulos, A., Forde, M.C. (2004). Advanced analysis of ground penetrating radar signals on railway. London, UK.

Clark, M.R., McCann, D.M., Forde, M.C. (2003). GPR as a tool for characterization of ballast. Proceedings of the international conference and exhibition railway engineering (2003). London, UK. 9 s.

Gallagher, G.P., Leiper, Q., Clark, M.R., Forde, M.C. (2000). Ballast evaluation using ground penetrating radar. Railway Gazette International, 2000. s. 101-102.

Gallagher, G.P., Leiper, Q., Williamson, R., Clark, M.R., Forde, M.C. (1999). The application of time domain ground penetrating radar to evaluate railway track ballast. NDT&E International 32 (1999) s. 463-468.

GLO-85 (1985). Geotekniset laboratorio-ohjeet. I luokituskokeet. Suomen Geoteknillinen yhdistys ry. Helsinki. Rakentajain kustannus Oy. 107 s.

Göbel, C., Hellmann, R., Petzold, H., (1994). Georadar-model and in-situ investigations for inspection of railway track. Proceedings of 5<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating radar. Kitchener, Canada. p. 1121-1133.

Hugenschmidt, J. (1998). Railway track inspection using GPR. Journal of applied geophysics 44 (1998) p. 147-155.

Hyslip, J.P., Selig, E.T., Smith, S.S., Olhoeft, G.R. (2003). Ground penetrating radar for railway substructure condition assessment.

Hänninen, P. (1992). Application of ground penetrating radar and radio wave moisture probe techniques to peatland investigations. (1992) Espoo, Geological Survey of Finland, Bulletin 361. 71 s.

Hänninen, P. (1991). Maatutkaluotaus maaperägeologisissa tutkimuksissa. Tutkimusraportti 103.(1991). Espoo, Geologian tutkimuskeskus. 33 s.



Jack, R., Jackson, P. (1999). Imaging attributes of railway track formation and ballast using ground probing radar. *NDT&E International* 32 (1999) pp. 457-462.

Kolisoja, P. (1997). Resilient deformation characteristics of granular materials. PhD thesis. Tampere University of Technology, Publication 223. 188 p., 13 app.

Lambot, S., Van Den Bosch, I., Slob, E. Frequency domain GPR signal forward and inverse modeling for identifying the subsurface dielectric properties. *EARSel eProceedings* 3. (2004). p. 398 – 404.

Maijala, P. (2000). Maatutkaluotausaineiston käsittely. Maatutkarengas ry:n 10-vuotisjuhlaseminaari. Kuopio, Maatutkarengas ry. (2000). 14 s.

Maijala, P. (1991). Maatutkaluotausaineisto ja sen käsittely. Oulun yliopisto, Geofysiikan laitos. (1991). 120 s.

Nurmikolu, A. (2006). Ratarakenteessa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkyys. Kokeellinen tutkimusosuus. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A9/2006. Helsinki, Ratahallintokeskus. 170 s. 44 liites.

Nurmikolu, A. (2005). Degradation and Frost Susceptibility of Crushed Rock Aggregates Used in Structural Layers of Railway Track. PhD thesis. Tampere University of Technology, Publication 567. 235 p., 6 app.

Nurmikolu, A. (2004). Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2004. Helsinki, Ratahallintokeskus. 193 s.

Nurmikolu, A. (2000). Raidesepelin lujuuden vaikutus tukikerroksen kestoikään. Ratahallintokeskuksen julkaisuja A 4/2000. Helsinki, Ratahallintokeskus, Tekninen yksikkö. 93 s., 34 liites.

PANK-2108 (1997). Kiviainekset, veden adsorptio. Päällystealan neuvottelukunta. 3 s.

Peltoniemi, M. (1988). Maa- ja kallioperän geofysikaaliset tutkimusmenetelmät. Otakustantamo. s. 411

Puikkonen, E. (1989). Ratatekniikka. Forssa, Suomen maarakentajien keskusliitto ry.

Ratahallintokeskus (2005a). SFS-EN 13450 raidesepelikiviainekset, CE - merkintä. Helsinki, Ratahallintokeskus. 2 s.

Ratahallintokeskus (2005b). Raidesepelin hankinta- ja toimitusohje, Liite 2 Arvonmuutosperusteet. Helsinki, Ratahallintokeskus. 6 s.

Ratahallintokeskus (2004). Päällysrakennetöiden yleiset laatuvaatimukset (PYL). Helsinki, Ratahallintokeskus. 40 s.

Ratahallintokeskus (2004). SFS-EN 13450 raidesepelikiviainekset, kansallinen sovellusohje. Helsinki, Ratahallintokeskus. 7 s.

Ratahallintokeskus (2002). Ratateknilliset määräykset ja ohjeet, osa 3, Radan rakenne. Helsinki, Ratahallintokeskus. 31 s., 2 liitettä.

Ratahallintokeskus (1999). Rautatien maarakennustöiden yleinen työselitys ja laatuvaatimukset, osa 5, Maaleikkaus ja pengerrystyöt. Helsinki, Ratahallintokeskus. 65 s.

Ratahallintokeskus (1997). Sepelitukikerroksen laadun tutkimusohje. Helsinki, Ratahallintokeskus. 3 s.

Roberts, R., Rudy, J., Al-Qadi, I., Tutumluer, E., Boyle, J. (2006). Railroad ballast fouling detection using ground penetrating radar – A new approach based on scattering from voids. ECNDT, Th.4.5.1. (2006). 8 p.

Saarenketo, T. (2006) Electrical properties of road materials and subgrade soils and the use of ground penetrating radar in traffic infrastructure surveys. PhD thesis. University of Oulu, 121 p., 5 app.

Saarenketo T., Maijala P. (2004). Rakenteen parantamissuunnittelua edeltävät maatutkatutkimukset ja tulosten esitystapa – menetelmäkuvaus. Helsinki, Tiehallinto. 41 s.

Saarenketo, T., Silvast, M., Noukka, J. (2003). Using GPR on railways to identify frost susceptible areas. In Proceedings of 6<sup>th</sup> International Conference on Railway Engineering. 2003. London, U.K. 4 p.

Saarenketo, T., Scullion, T. (2000). Road evaluation with ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics 44 (2000) s. 119-138.

Saarenketo, T., Scullion, T. (1995). Using Electrical properties to classify the strength properties of base course aggregates. Research report 1341-2. Texas Transportation Institute, Texas. 71 p.

Selig, E. T., Waters, J. M. (1994). Track geotechnology and substructure management. London, Thomas Telford Publications. 407 s.

SFS-EN 933-1 (1998). Kiviainesten geometrysten ominaisuuksien testaus. Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Seulontamenetelmä. SFS. 13 s

SFS-EN 1097-6 (2001). Kiviainesten mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien testaus. Osa 6: Kiintotiheyden ja vedenimeytymisen määrittäminen. SFS. 27 s.

SFS-EN 13450 (2003). Raidesepelikiviainekset. 31 s. 1 liites.

Silvast, M., Nurmikolu, A., Kolisoja, P., Levomäki, M. (2007). GPR Technique in the Analysis of Railway Track Structure. 14<sup>th</sup> European Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Madrid, Spain. 6 s. To be published.

Silvast, M., Nurmikolu, A. (2005). Radan päällys- ja alusrakenteen tutkiminen maatutkalla. Loppuraportti. (2005). 40 s. + 17 liites. Ratahallintokeskuksen tutkimusraportti. Julkaisematon.

Silvast, M., Levomäki, M., Nurmikolu, A., Noukka, J. (2006). NDT Techniques in Railway Structure Analysis. 7<sup>th</sup> World Congress on Railway Research (2006). Montreal, Canada. 8 p.

Smekal, A., Berggren, E.G., Silvast, M. (2006). Monitoring and Substructure Condition Assessment of Existing Railway Lines for Upgrading to Higher Axle Loads and Speeds. 7<sup>th</sup> World Congress on Railway Research (2006). Montreal, Canada. 8 p.

Suomen geoteknillinen yhdistys ry (1991). Geofysikaaliset menetelmät, maatutkaluotaus. Tampere, Rakentajain kustannus. 68 s.

Sussmann, T.R., O'Hara, K.R., Selig, E.T. (2002). Development of Material Properties for Railway Application of Ground Penetrating Radar. Proceedings of the 9<sup>th</sup> International Conference on Ground Penetrating Radar. (2002). Santa Barbara, California. pp. 42-47.

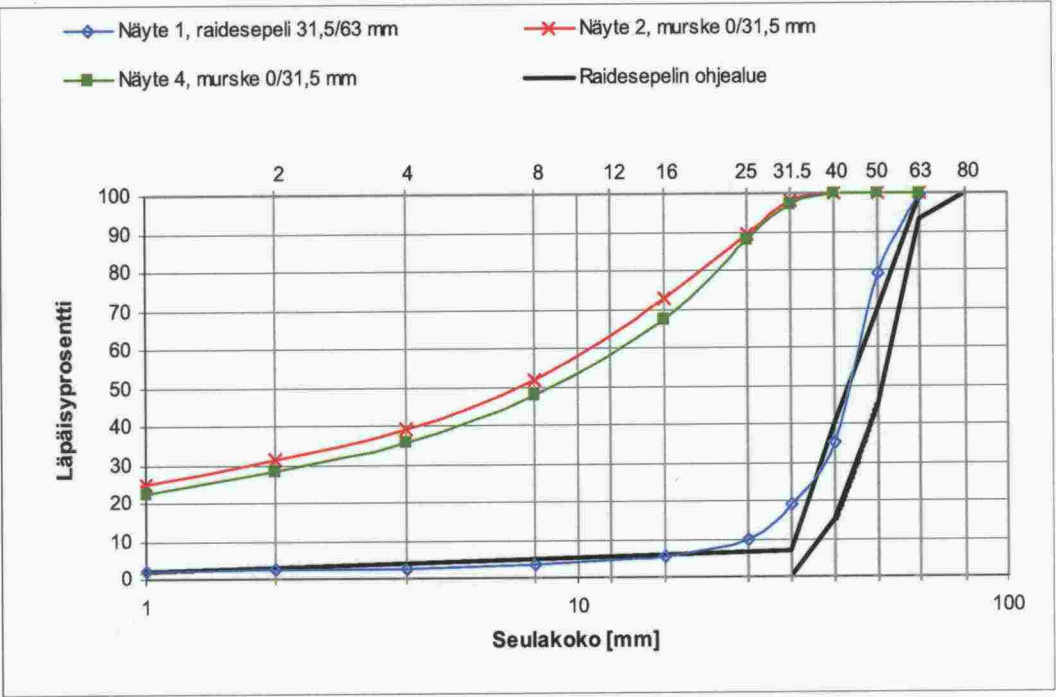
Sussmann, T.R., Selig, E.T., Hyslip, J.P. (2001). Railway track condition indicators from ground penetrating radar. NDT&E International 36 (2003), Vol 36, Issue 3, pp. 157-167.

Topp, G.C., Davis, J.L., Annan, A.P. (1980). Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. Water Resources Research 16 (3). pp. 574 – 582.

Uusi-Luomalahti, P.J. (1994). Raidesepeliksi soveltuvan kiviaineksen laatuvaatimukset. Diplomityö. Tampereen teknillinen yliopisto, rakennustekniikan osasto. 97 s., 19 liites.



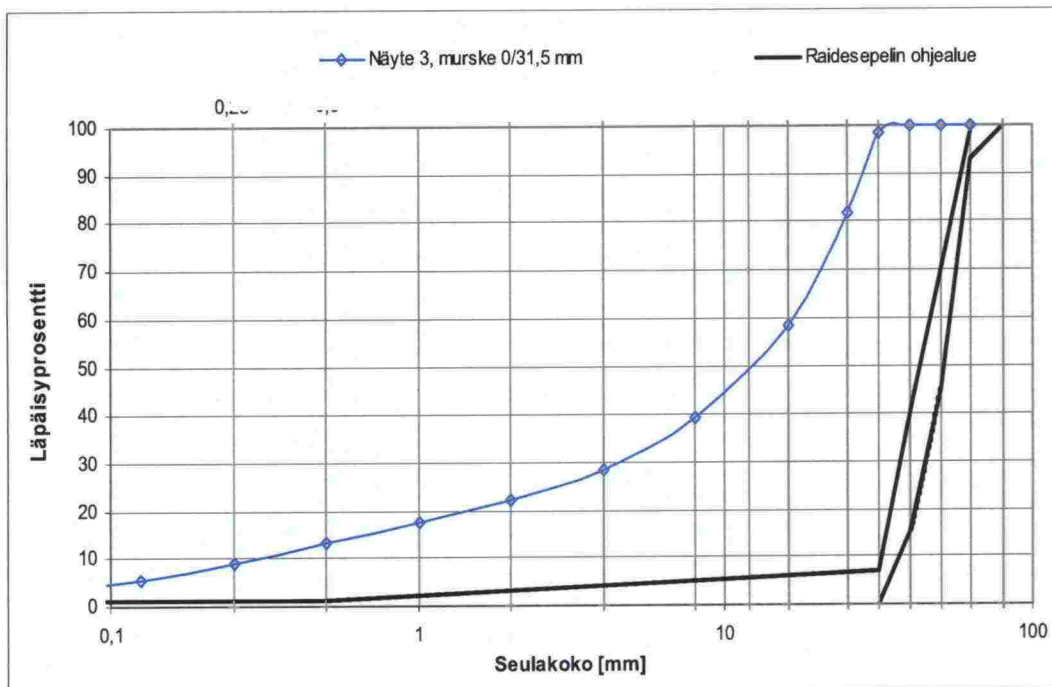
Keinotekoisen tutkimustapauksen (TTY:n laboratorio) näytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



PESUSEULONTA:

|                                 | Massa [g] | Lämpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Lämpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Lämpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Lämpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
|---------------------------------|-----------|---------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------------|--------------------|
| Näyte 1, raidesepeli 31,5/63 mm | 9675      | 9,8                             | 3,5                            | 2,0                            | 0,4                                | 15                 |
| Näyte 2, murske 0/31,5 mm       | 8447      | 89,4                            | 51,8                           | 24,9                           | 4,8                                | 166                |
| Näyte 4, murske 0/31,5 mm       | 10147     | 87,7                            | 47,9                           | 22,4                           | 4,3                                | 158                |
|                                 |           |                                 |                                |                                |                                    |                    |
|                                 |           |                                 |                                |                                |                                    |                    |
|                                 |           |                                 |                                |                                |                                    |                    |
|                                 |           |                                 |                                |                                |                                    |                    |
|                                 |           |                                 |                                |                                |                                    |                    |

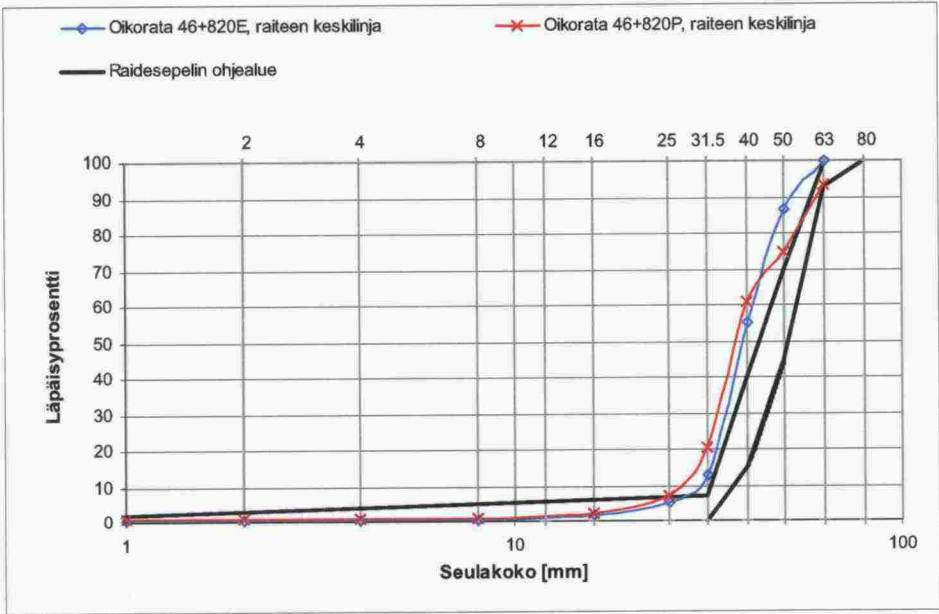
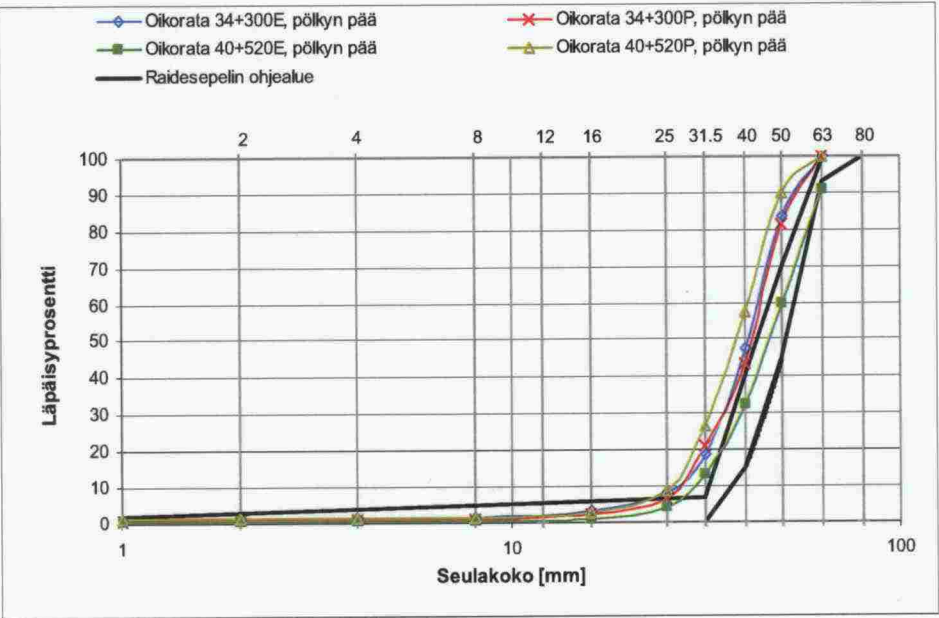
### Keinotekoisien tutkimustapauksen (TTY:n laboratorio) näytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



PESUSEULONTA:

[illegible]

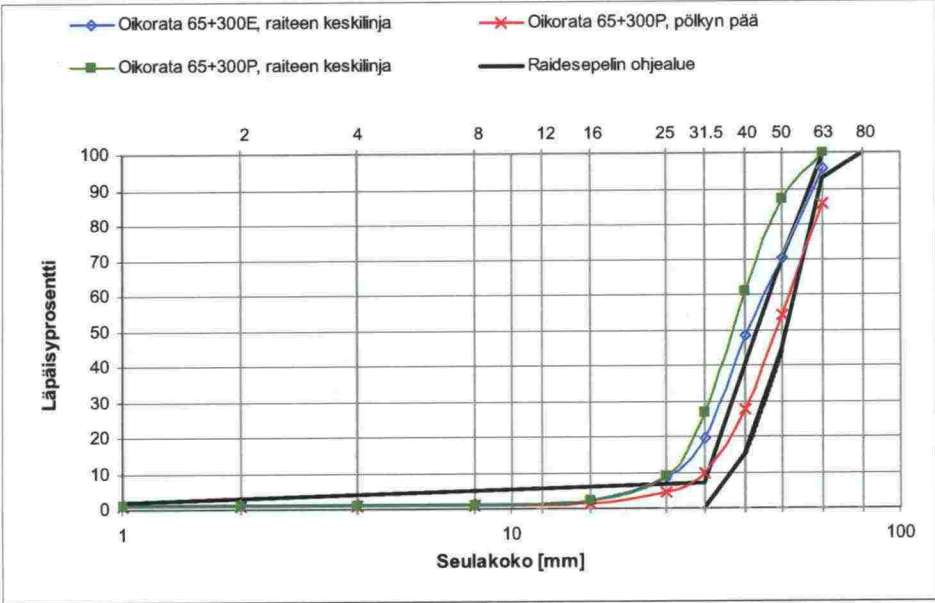
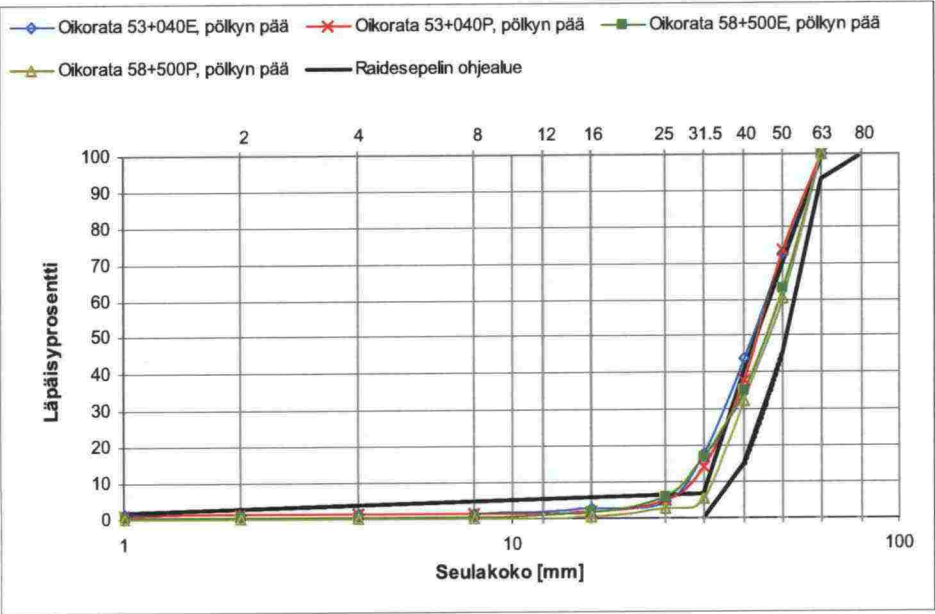
Rataosan Kerava–Lahti raideseppelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



| PESUSEULONTA: | Massa [g]                            | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |    |
|---------------|--------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|----|
|               | Oikorata 34+300E, pölkyn pää         | 7138                           | 8,2                           | 1,3                           | 1,1                               | 0,6                | 11 |
|               | Oikorata 34+300P, pölkyn pää         | 6595                           | 6,6                           | 0,7                           | 0,7                               | 0,4                | 8  |
|               | Oikorata 40+520E, pölkyn pää         | 7408                           | 3,9                           | 0,6                           | 0,6                               | 0,3                | 5  |
|               | Oikorata 40+520P, pölkyn pää         | 6498                           | 8,6                           | 1,5                           | 1,3                               | 0,7                | 11 |
|               | Oikorata 46+820E, raiteen keskilinja | 7105                           | 5,2                           | 0,6                           | 0,5                               | 0,3                | 6  |
|               | Oikorata 46+820P, raiteen keskilinja | 6317                           | 7,0                           | 1,1                           | 0,9                               | 0,5                | 9  |
|               |                                      |                                |                               |                               |                                   |                    |    |



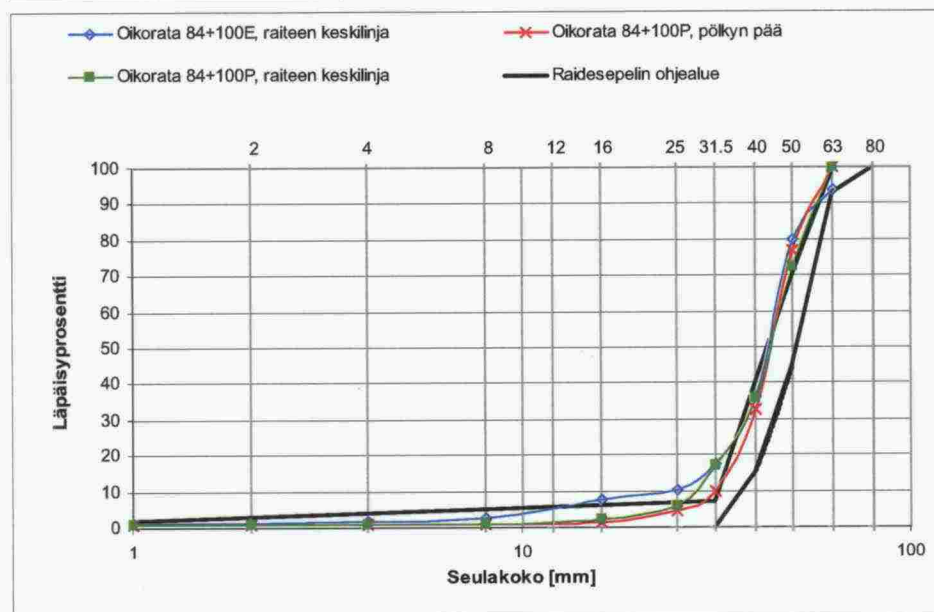
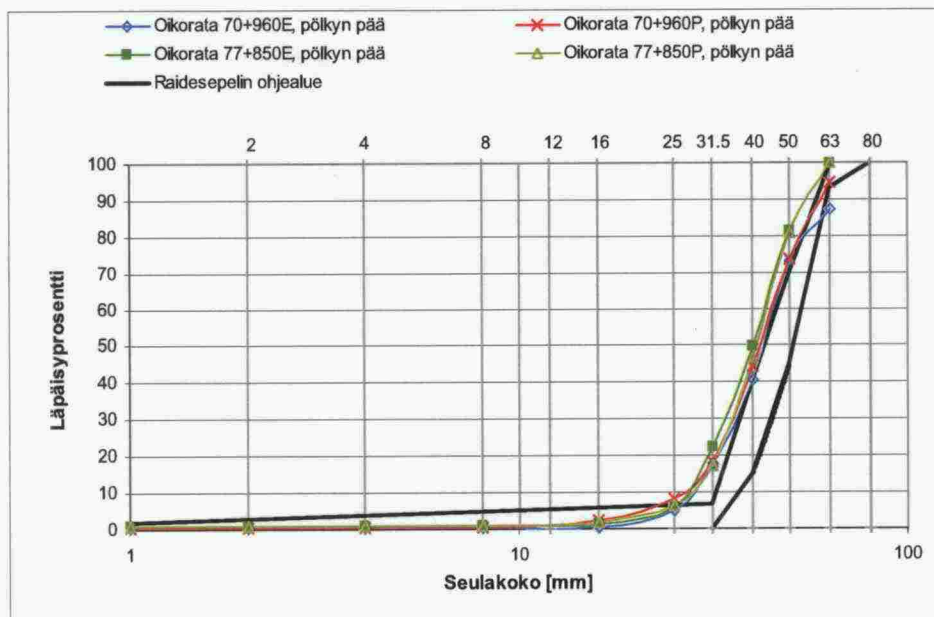
Rataosan Kerava–Lahti raideseppelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



PESUSEULONTA:

|                                      | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
|--------------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Oikorata 53+040E, pölkyn pää         | 7524      | 4,8                            | 1,4                           | 1,2                           | 0,6                               | 7                  |
| Oikorata 53+040P, pölkyn pää         | 6615      | 5,0                            | 1,2                           | 1,1                           | 0,6                               | 7                  |
| Oikorata 58+500E, pölkyn pää         | 6488      | 5,9                            | 0,6                           | 0,5                           | 0,3                               | 7                  |
| Oikorata 58+500P, pölkyn pää         | 5835      | 2,8                            | 0,1                           | 0,1                           | 0,1                               | 3                  |
| Oikorata 65+300E, raiteen keskilinja | 7497      | 8,8                            | 1,2                           | 1,1                           | 0,6                               | 11                 |
| Oikorata 65+300P, pölkyn pää         | 6573      | 4,6                            | 0,8                           | 0,7                           | 0,5                               | 6                  |
| Oikorata 65+300P, raiteen keskilinja | 6521      | 8,7                            | 1,0                           | 1,0                           | 0,5                               | 11                 |

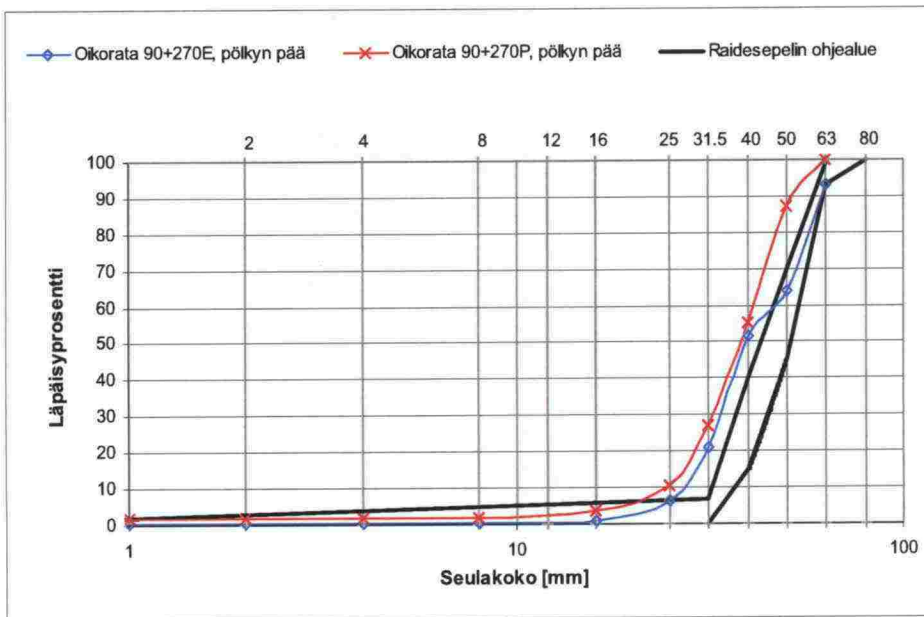
# Rataosan Kerava–Lahti raideseppelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



## PESUSEULONTA:

|                                      | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
|--------------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Oikorata 70+960E, pölkyn pää         | 7414      | 5,0                            | 0,6                           | 0,6                           | 0,33                              | 6                  |
| Oikorata 70+960P, pölkyn pää         | 6538      | 8,0                            | 0,6                           | 0,5                           | 0,28                              | 9                  |
| Oikorata 77+850E, pölkyn pää         | 6982      | 5,9                            | 0,9                           | 0,9                           | 0,6                               | 8                  |
| Oikorata 77+850P, pölkyn pää         | 5918      | 6,6                            | 1,1                           | 1,0                           | 0,6                               | 9                  |
| Oikorata 84+100E, raiteen keskilinja | 6460      | 10,1                           | 2,7                           | 1,4                           | 0,67                              | 14                 |
| Oikorata 84+100P, pölkyn pää         | 6065      | 4,4                            | 0,8                           | 0,8                           | 0,46                              | 6                  |
| Oikorata 84+100P, raiteen keskilinja | 6099      | 5,7                            | 1,1                           | 0,8                           | 0,4                               | 8                  |

# Rataosan Kerava–Lahti raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät

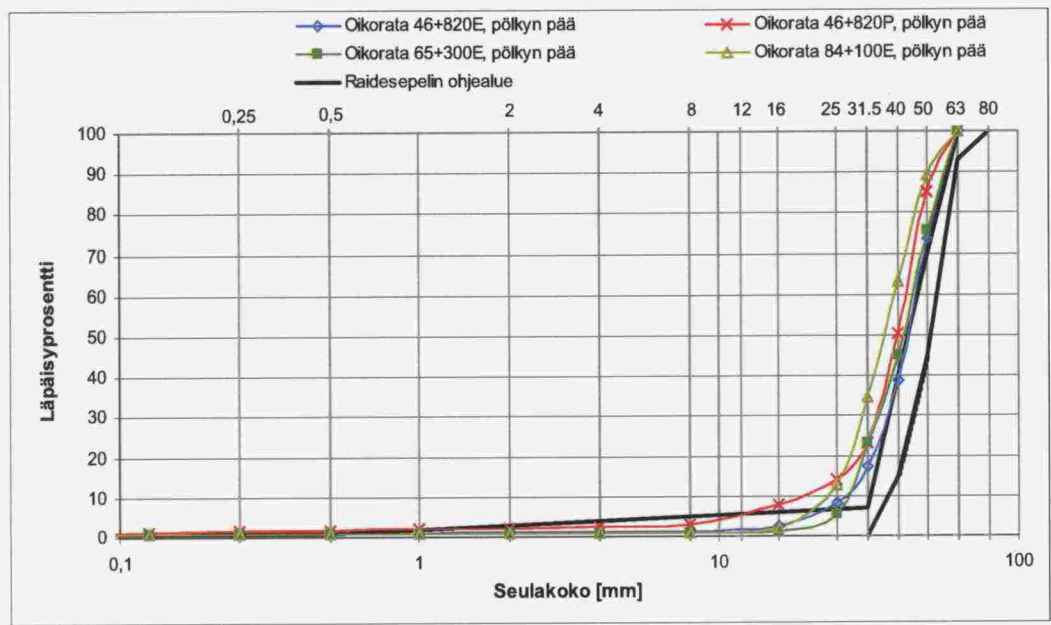


PESUSEULONTA:

|                              | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
|------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Oikorata 90+270E, pölkyn pää | 5791      | 6,3                            | 0,6                           | 0,5                           | 0,31                              | 7                  |
| Oikorata 90+270P, pölkyn pää | 6902      | 10,7                           | 1,8                           | 1,7                           | 0,88                              | 14                 |

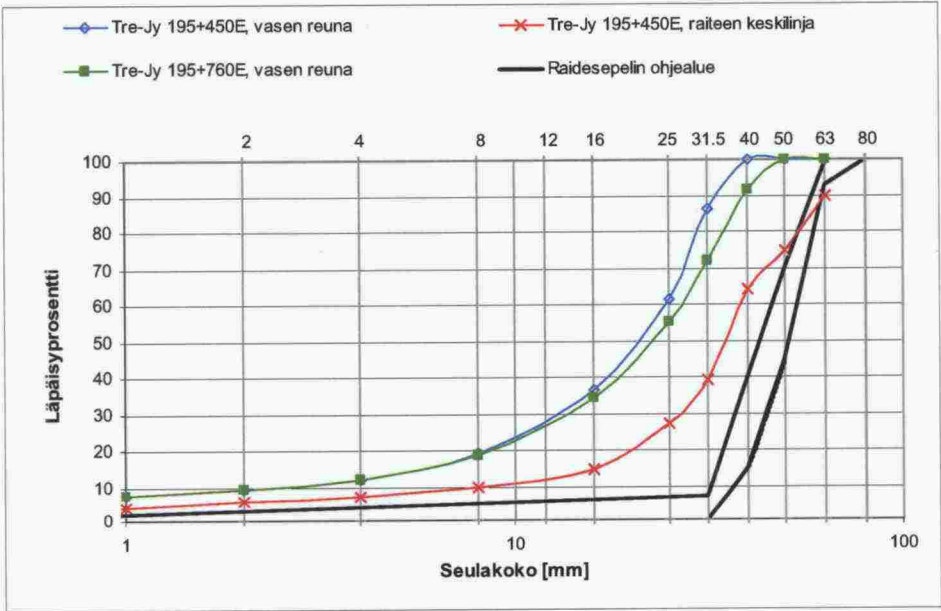
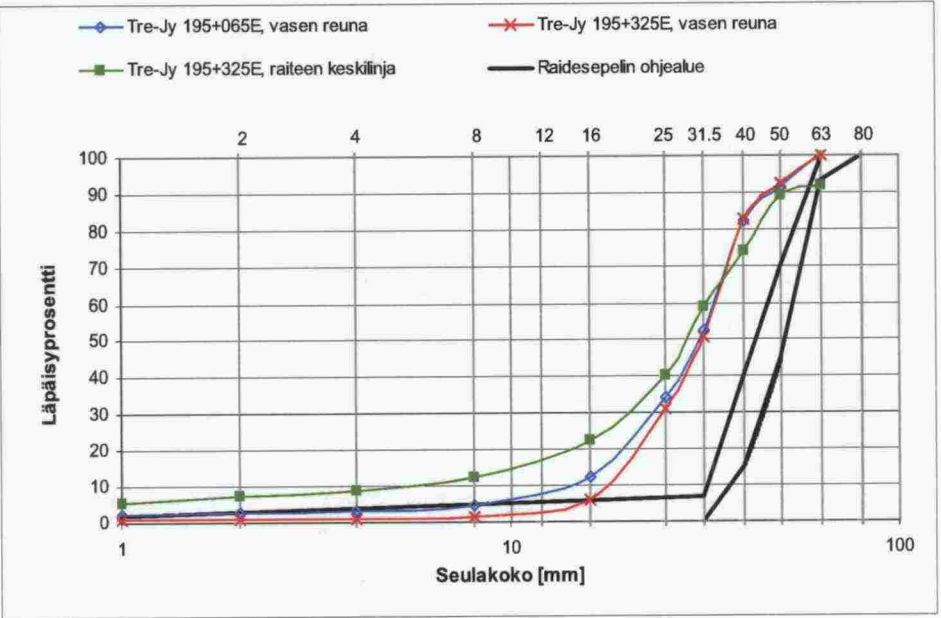


Rataosan Kerava–Lahti raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



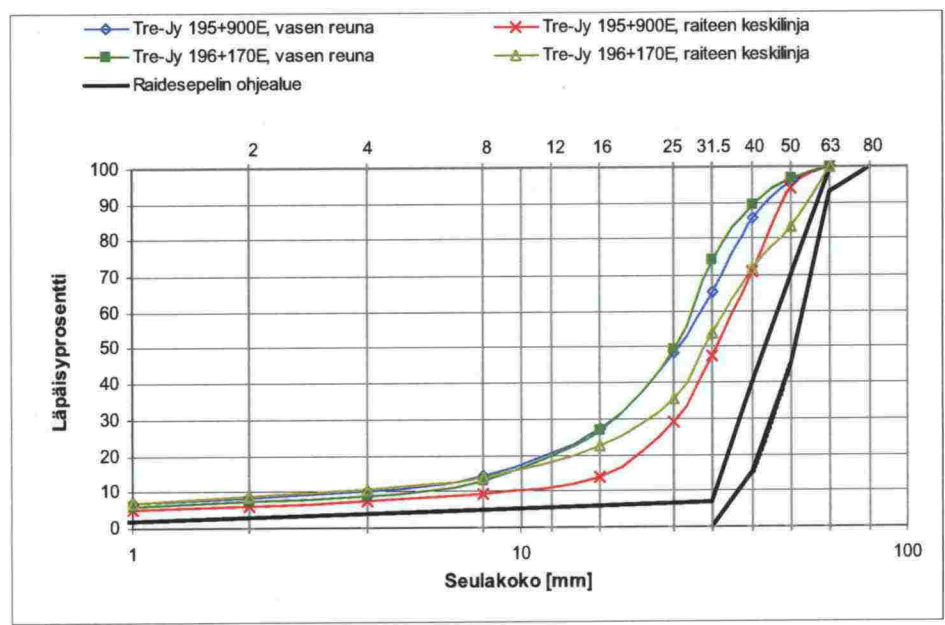
|                              |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
|------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| PESUSEULONTA:                |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
|                              | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
| Oikorata 46+820E, pölkyn pää | 6509      | 8,1                            | 1,2                           | 1,0                           | 0,5                               | 10                 |
| Oikorata 46+820P, pölkyn pää | 6890      | 14,1                           | 3,1                           | 2,0                           | 0,9                               | 19                 |
| Oikorata 65+300E, pölkyn pää | 5966      | 5,6                            | 1,0                           | 0,9                           | 0,5                               | 8                  |
| Oikorata 84+100E, pölkyn pää | 5833      | 12,8                           | 1,0                           | 1,0                           | 0,6                               | 15                 |

Rataosan Tampere–Jyväskylä raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



|                                     |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
|-------------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| PESUSEULONTA:                       |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
|                                     | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
| Tre-Jy 195+065E, vasen reuna        | 6206      | 34,1                           | 4,5                           | 2,4                           | 0,8                               | 41                 |
| Tre-Jy 195+325E, vasen reuna        | 5296      | 30,9                           | 1,3                           | 0,8                           | 0,3                               | 33                 |
| Tre-Jy 195+325E, raiteen keskilinja | 6460      | 40,1                           | 12,5                          | 5,7                           | 1,7                               | 58                 |
|                                     |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
| Tre-Jy 195+450E, vasen reuna        | 5923      | 61,2                           | 19,2                          | 7,6                           | 2,2                               | 88                 |
| Tre-Jy 195+450E, raiteen keskilinja | 6500      | 27,0                           | 9,9                           | 4,2                           | 1,1                               | 41                 |
| Tre-Jy 195+760E, vasen reuna        | 5210      | 55,3                           | 18,5                          | 7,4                           | 2,3                               | 81                 |

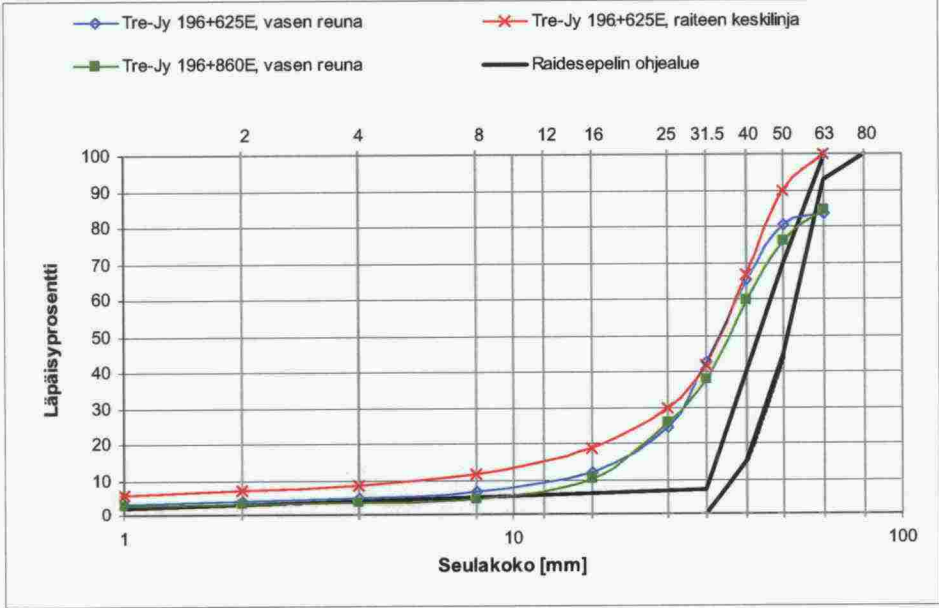
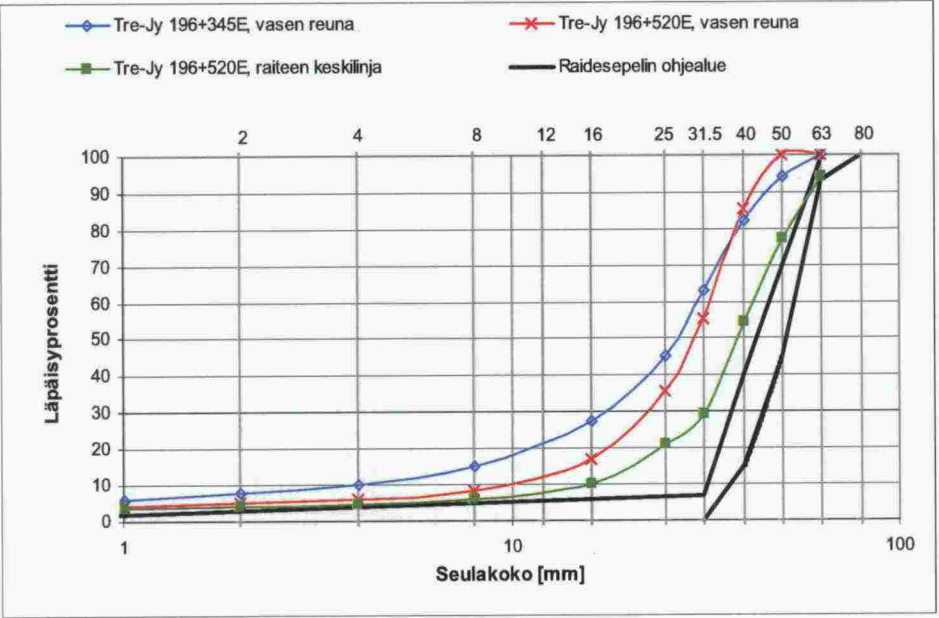
Rataosan Tampere–Jyväskylä raideseppelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



| PESUSEULONTA:                       |                                     |                                |                               |                               |                                   |                    |    |
|-------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|----|
|                                     | Massa [g]                           | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |    |
|                                     | Tre-Jy 195+900E, vasen reuna        | 5472                           | 48,4                          | 14,5                          | 7,0                               | 2,4                | 70 |
|                                     | Tre-Jy 195+900E, raiteen keskilinja | 6613                           | 28,9                          | 9,1                           | 5,1                               | 1,7                | 43 |
|                                     | Tre-Jy 196+170E, vasen reuna        | 5613                           | 49,1                          | 13,0                          | 5,8                               | 2,0                | 68 |
| Tre-Jy 196+170E, raiteen keskilinja | 6750                                | 35,3                           | 14,0                          | 7,0                           | 2,0                               | 56                 |    |



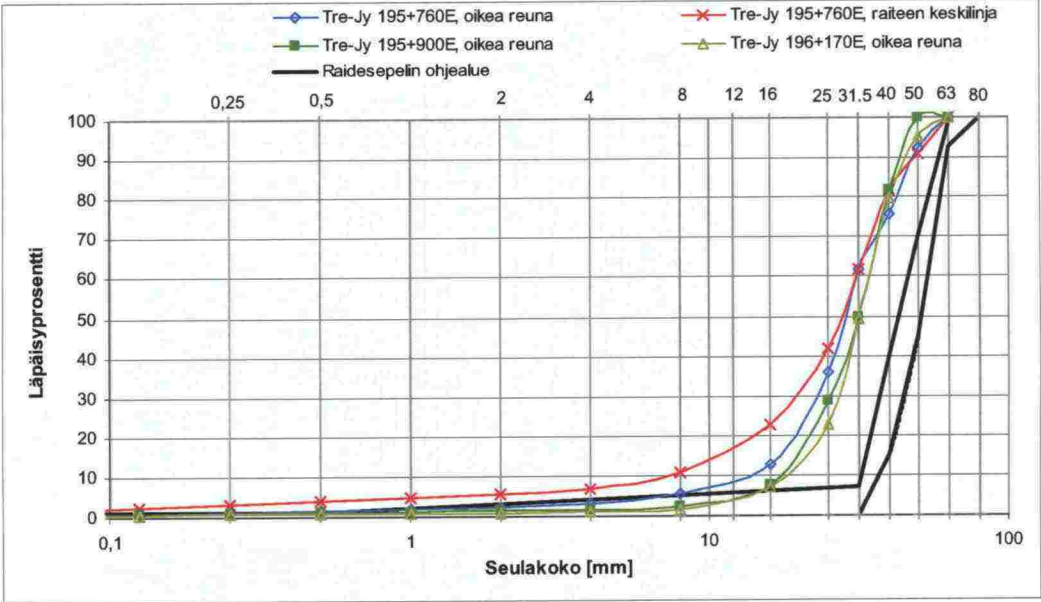
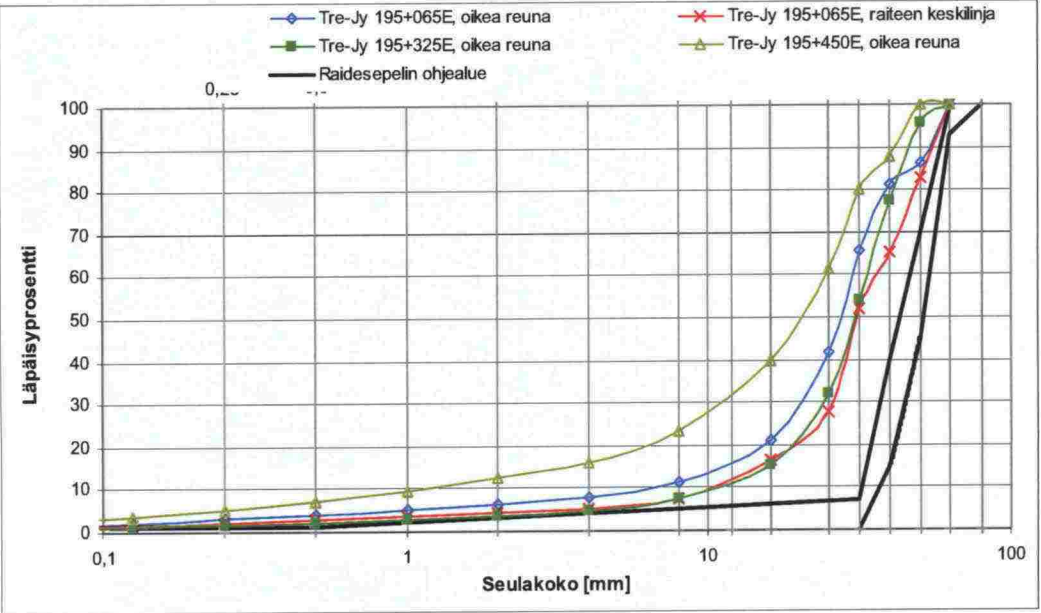
Rataosan Tampere–Jyväskylä raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



PESUSEULONTA:

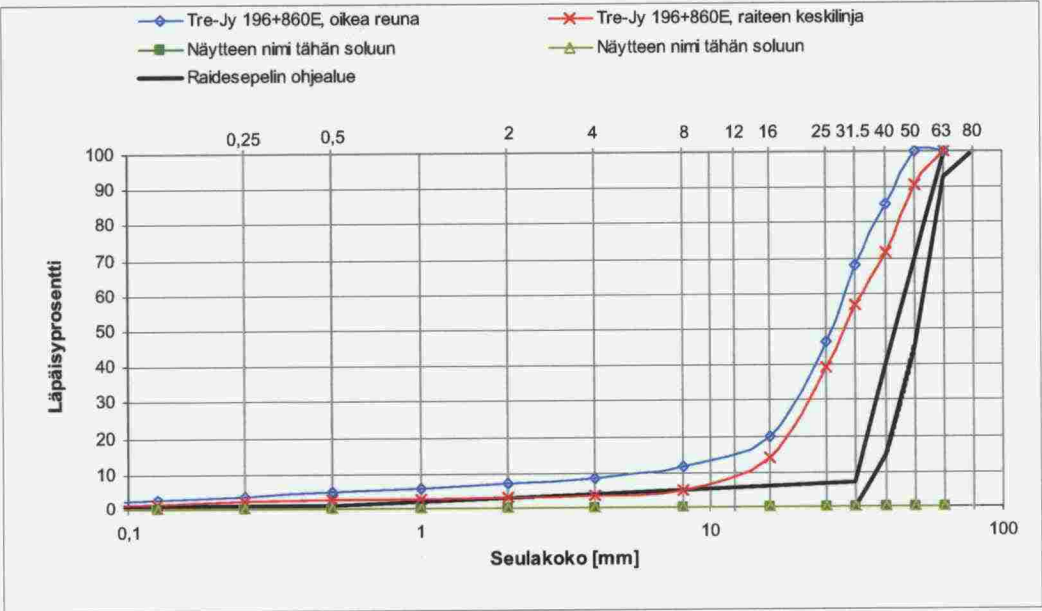
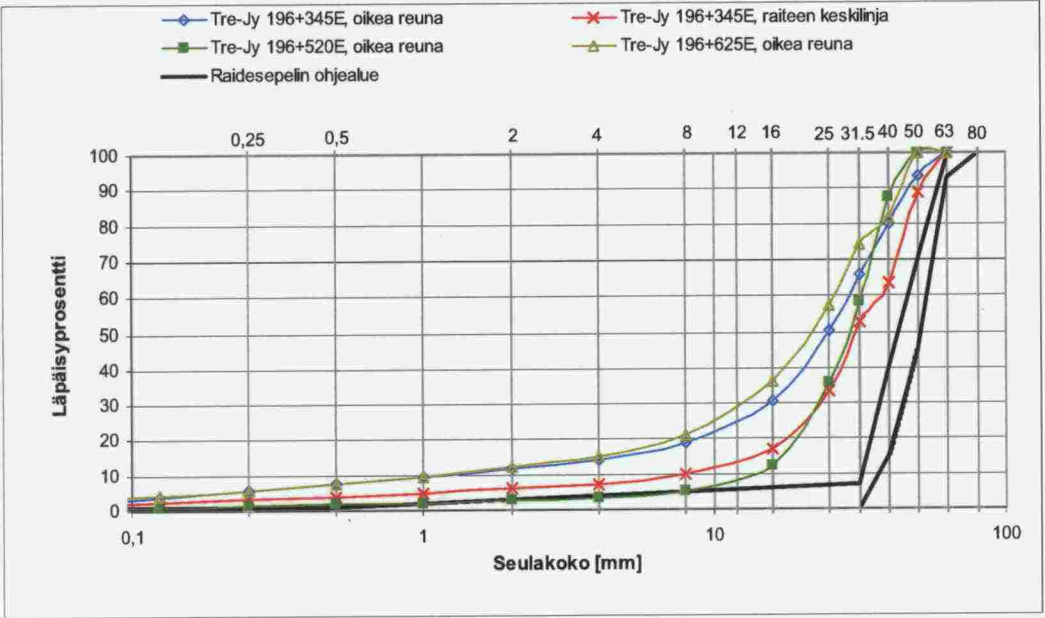
|                                     | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
|-------------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Tre-Jy 196+345E, vasen reuna        | 6096      | 45,4                           | 15,1                          | 5,8                           | 1,6                               | 66                 |
| Tre-Jy 196+520E, vasen reuna        | 6951      | 35,5                           | 8,2                           | 4,1                           | 1,5                               | 48                 |
| Tre-Jy 196+520E, raiteen keskilinja | 6912      | 20,8                           | 5,9                           | 3,5                           | 1,2                               | 30                 |
|                                     |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
| Tre-Jy 196+625E, vasen reuna        | 6416      | 24,5                           | 6,5                           | 3,1                           | 0,9                               | 34                 |
| Tre-Jy 196+625E, raiteen keskilinja | 6066      | 29,9                           | 11,4                          | 5,6                           | 1,8                               | 47                 |
| Tre-Jy 196+860E, vasen reuna        | 6454      | 25,7                           | 4,6                           | 2,5                           | 1,0                               | 33                 |

Rataosan Tampere–Jyväskylä raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



| PESUSEULONTA:                       |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
|-------------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
|                                     | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
| Tre-Jy 195+065E, oikea reuna        | 5975      | 41,6                           | 11,5                          | 5,0                           | 1,4                               | 58                 |
| Tre-Jy 195+065E, raiteen keskilinja | 5252      | 27,6                           | 7,3                           | 3,4                           | 1,1                               | 38                 |
| Tre-Jy 195+325E, oikea reuna        | 5732      | 31,9                           | 7,5                           | 2,7                           | 0,8                               | 42                 |
| Tre-Jy 195+450E, oikea reuna        | 6091      | 61,3                           | 23,3                          | 9,5                           | 2,4                               | 94                 |
| Tre-Jy 195+760E, oikea reuna        | 5790      | 35,9                           | 5,5                           | 1,9                           | 0,7                               | 43                 |
| Tre-Jy 195+760E, raiteen keskilinja | 5418      | 41,6                           | 10,6                          | 4,8                           | 1,8                               | 57                 |
| Tre-Jy 195+900E, oikea reuna        | 5650      | 28,7                           | 2,4                           | 1,3                           | 0,6                               | 32                 |
| Tre-Jy 196+170E, oikea reuna        | 6821      | 22,7                           | 1,5                           | 0,8                           | 0,4                               | 25                 |

Rataosan Tampere-Jyväskylä raideseppelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät

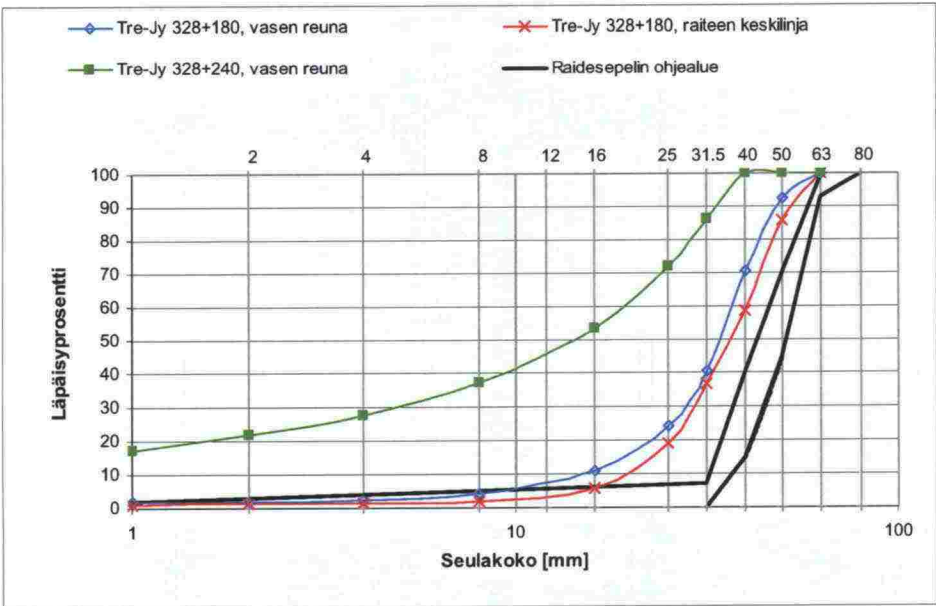
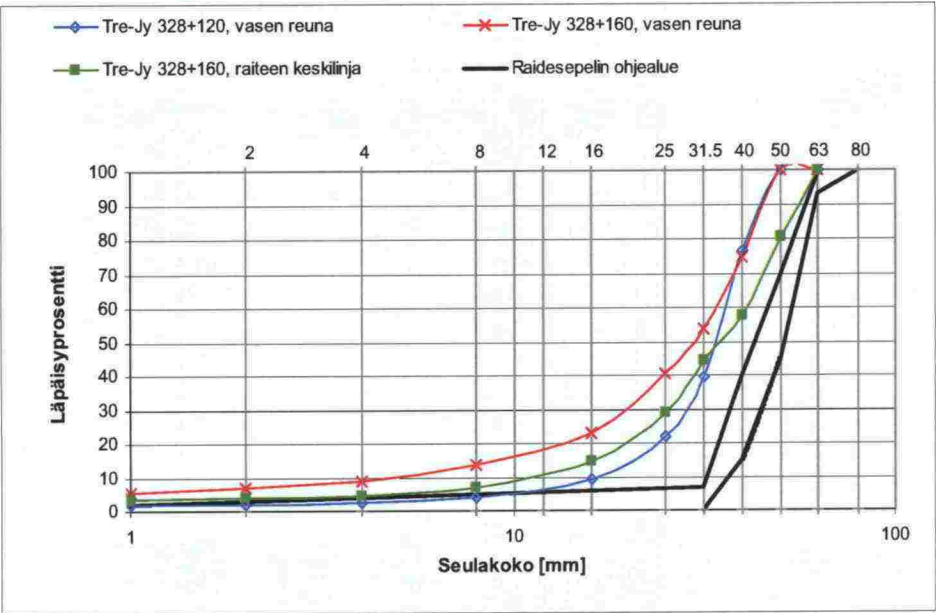


PESUSEULONTA:

|                                     | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
|-------------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Tre-Jy 196+345E, oikea reuna        | 6922      | 50,4                           | 18,9                          | 9,6                           | 2,5                               | 79                 |
| Tre-Jy 196+345E, raiteen keskilinja | 5522      | 33,3                           | 9,7                           | 4,8                           | 1,7                               | 48                 |
| Tre-Jy 196+520E, oikea reuna        | 5223      | 35,8                           | 5,0                           | 2,1                           | 0,8                               | 43                 |
| Tre-Jy 196+625E, oikea reuna        | 5812      | 57,2                           | 21,0                          | 9,4                           | 2,9                               | 88                 |
| Tre-Jy 196+860E, oikea reuna        | 5735      | 46,4                           | 11,8                          | 5,7                           | 2,0                               | 64                 |
| Tre-Jy 196+860E, raiteen keskilinja | 6059      | 39,1                           | 4,9                           | 2,9                           | 1,1                               | 47                 |
|                                     |           |                                |                               |                               |                                   |                    |

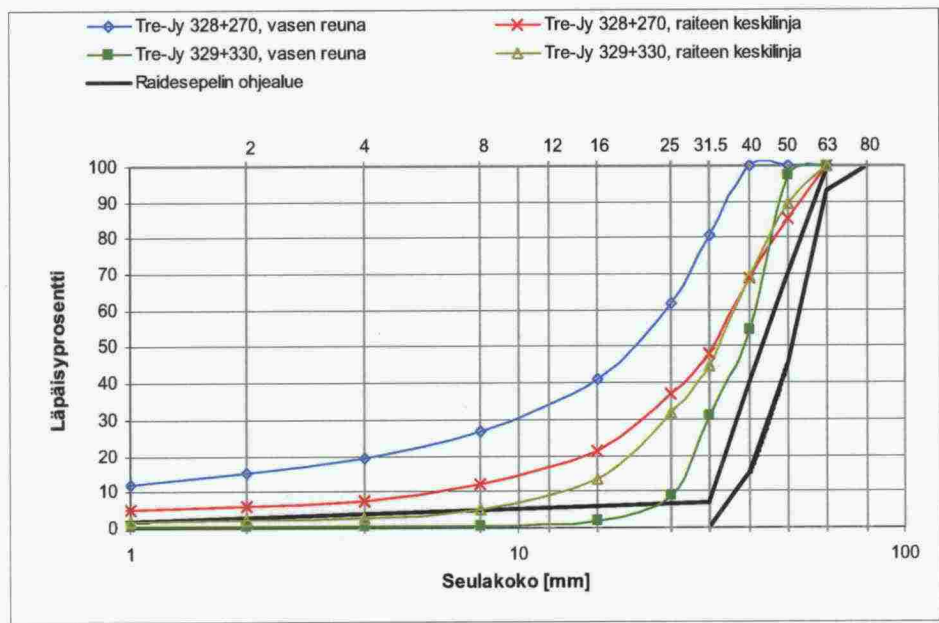


Rataosan Tampere–Jyväskylä raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



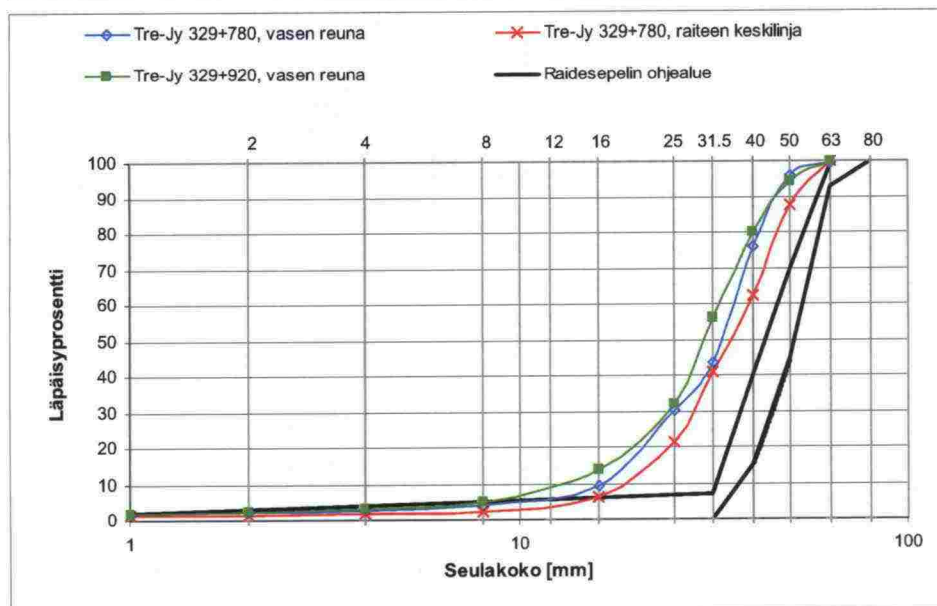
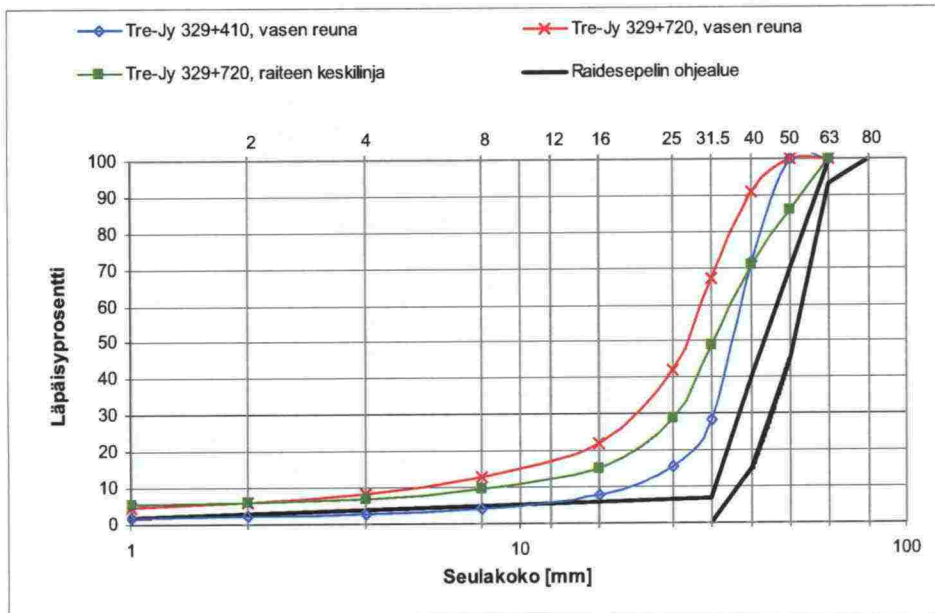
|                                    |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
|------------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| PESUSEULONTA:                      |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
|                                    | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
| Tre-Jy 328+120, vasen reuna        | 5541      | 22,2                           | 4,1                           | 1,8                           | 0,6                               | 28                 |
| Tre-Jy 328+160, vasen reuna        | 4328      | 40,7                           | 13,9                          | 5,2                           | 1,6                               | 60                 |
| Tre-Jy 328+160, raiteen keskilinja | 5631      | 28,6                           | 6,9                           | 3,2                           | 1,1                               | 39                 |
| Tre-Jy 328+180, vasen reuna        | 5640      | 24,1                           | 4,2                           | 1,7                           | 0,7                               | 30                 |
| Tre-Jy 328+180, raiteen keskilinja | 5896      | 19,2                           | 1,9                           | 1,1                           | 0,4                               | 22                 |
| Tre-Jy 328+240, vasen reuna        | 4710      | 71,7                           | 37,4                          | 17,3                          | 4,5                               | 126                |

Rataosan Tampere-Jyväskylä raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



| PESUSEULONTA:                      | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
|------------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Tre-Jy 328+270, vasen reuna        | 4983      | 62,0                           | 26,5                          | 12,1                          | 3,2                               | 101                |
| Tre-Jy 328+270, raiteen keskilinja | 5064      | 36,8                           | 11,9                          | 5,1                           | 1,8                               | 54                 |
| Tre-Jy 329+330, vasen reuna        | 6361      | 8,6                            | 0,7                           | 0,5                           | 0,2                               | 10                 |
| Tre-Jy 329+330, raiteen keskilinja | 4901      | 31,6                           | 5,1                           | 2,0                           | 0,7                               | 39                 |

# Rataosan Tampere-Jyväskylä raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät

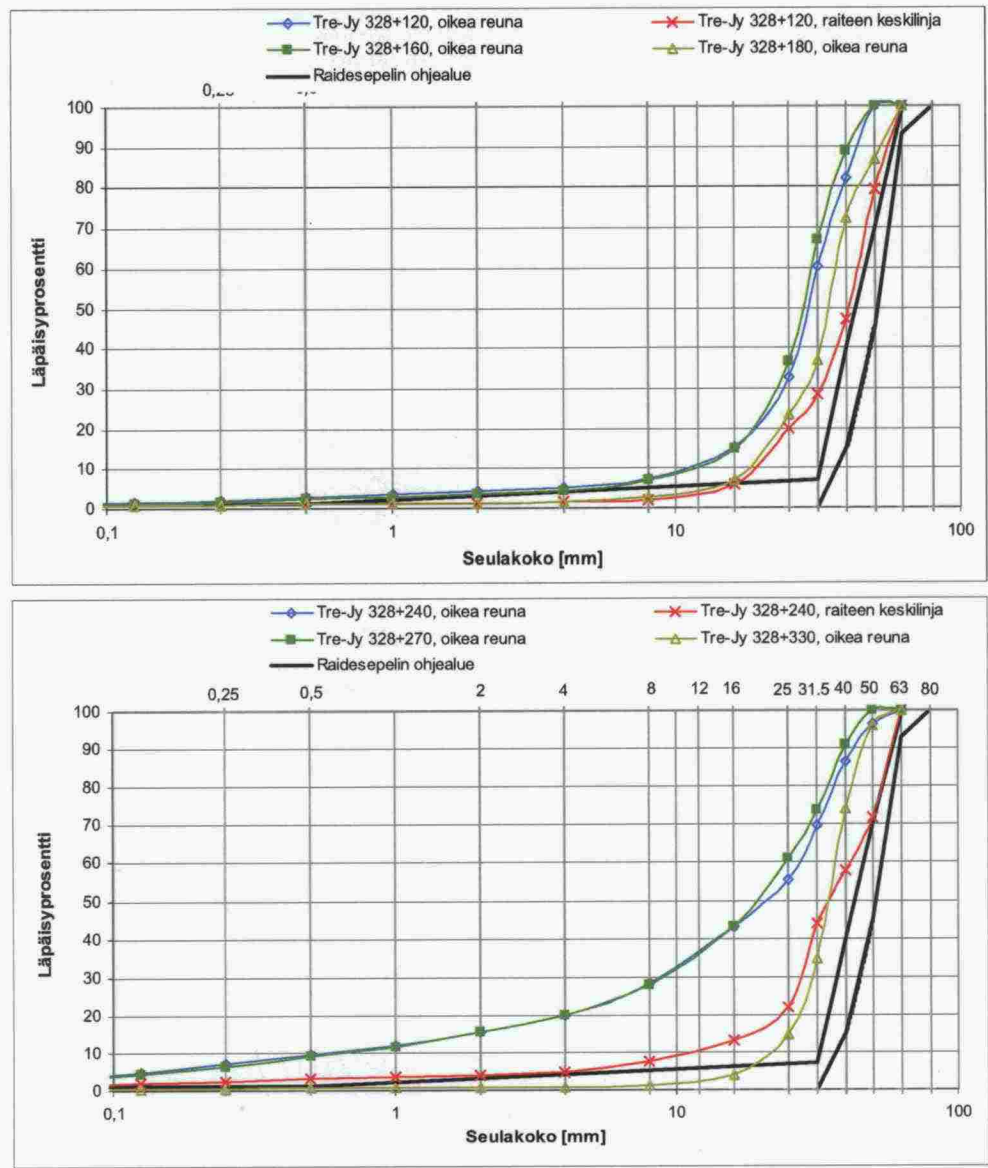


## PESUSEULONTA:

|                                    | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
|------------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| Tre-Jy 329+410, vasen reuna        | 6388      | 15,7                           | 4,2                           | 1,8                           | 0,6                               | 22                 |
| Tre-Jy 329+720, vasen reuna        | 4942      | 42,1                           | 12,7                          | 4,6                           | 1,3                               | 59                 |
| Tre-Jy 329+720, raiteen keskilinja | 5624      | 28,6                           | 9,5                           | 5,3                           | 1,8                               | 43                 |
|                                    |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
| Tre-Jy 329+780, vasen reuna        | 5106      | 30,2                           | 3,9                           | 1,7                           | 0,6                               | 36                 |
| Tre-Jy 329+780, raiteen keskilinja | 5529      | 21,2                           | 2,2                           | 1,3                           | 0,6                               | 25                 |
| Tre-Jy 329+920, vasen reuna        | 4756      | 31,8                           | 4,8                           | 2,0                           | 0,6                               | 39                 |

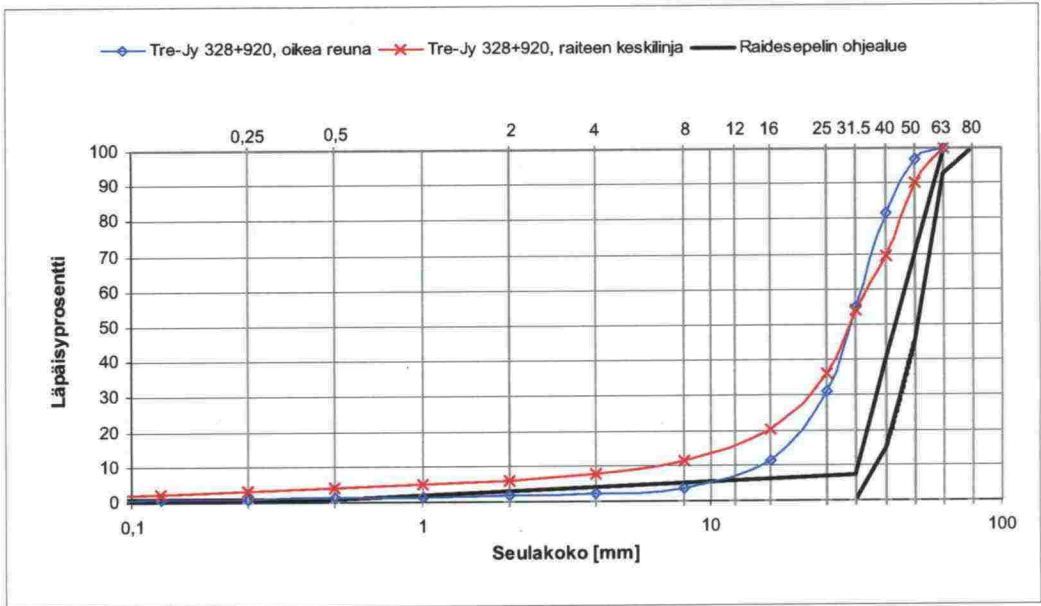
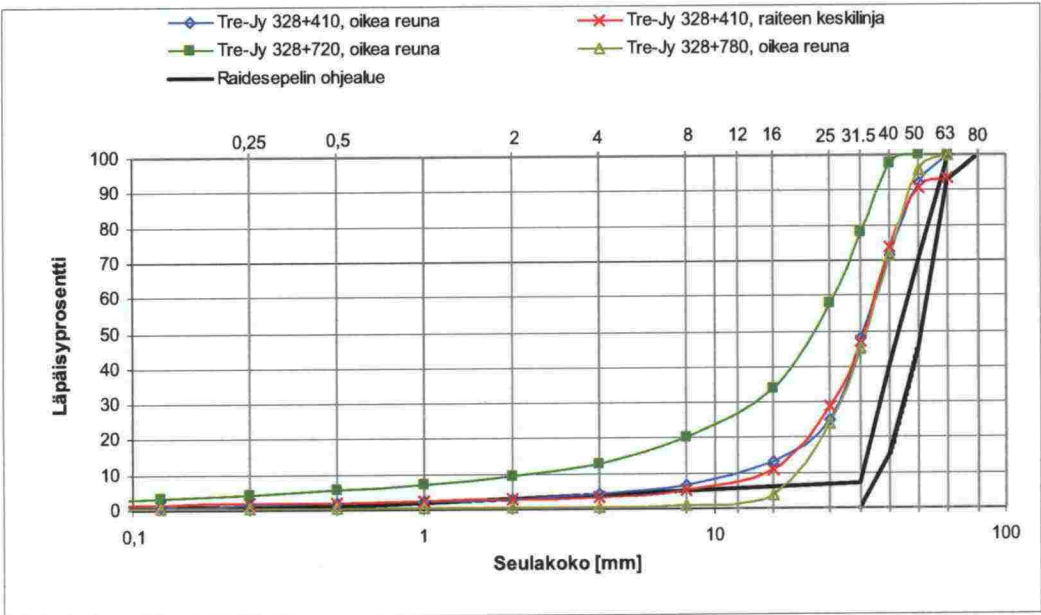


Rataosan Tampere–Jyväskylä raideseppelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



|                                    |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
|------------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
| PESUSEULONTA:                      | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
|                                    |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
| Tre-Jy 328+120, oikea reuna        | 5078      | 32,5                           | 7,4                           | 3,3                           | 1,0                               | 43                 |
| Tre-Jy 328+120, raiteen keskilinja | 6198      | 19,7                           | 1,8                           | 1,1                           | 0,5                               | 23                 |
| Tre-Jy 328+160, oikea reuna        | 5220      | 36,6                           | 7,0                           | 2,8                           | 0,9                               | 46                 |
| Tre-Jy 328+180, oikea reuna        | 5596      | 23,5                           | 2,6                           | 1,1                           | 0,4                               | 27                 |
| Tre-Jy 328+240, oikea reuna        | 5425      | 55,6                           | 28,4                          | 12,0                          | 3,1                               | 96                 |
| Tre-Jy 328+240, raiteen keskilinja | 5894      | 22,1                           | 7,4                           | 3,6                           | 1,2                               | 33                 |
| Tre-Jy 328+270, oikea reuna        | 4403      | 60,8                           | 27,9                          | 11,7                          | 2,8                               | 100                |
| Tre-Jy 328+330, oikea reuna        | 6961      | 14,6                           | 1,2                           | 0,7                           | 0,4                               | 17                 |

Rataosan Tampere–Jyväskylä raidesepelinäytteiden seulontatiedot ja rakeisuuskäyrät



| PESUSEULONTA:                      |           |                                |                               |                               |                                   |                    |
|------------------------------------|-----------|--------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
|                                    | Massa [g] | Läpäisy %<br>25 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>8 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>1 mm<br>seulalla | Läpäisy %<br>0.063 mm<br>seulalla | Rakeisuus-<br>luku |
| Tre-Jy 328+410, oikea reuna        | 6387      | 24,7                           | 6,5                           | 2,3                           | 0,7                               | 34                 |
| Tre-Jy 328+410, raiteen keskilinja | 5969      | 28,5                           | 5,0                           | 2,3                           | 1,0                               | 36                 |
| Tre-Jy 328+720, oikea reuna        | 4915      | 57,7                           | 20,0                          | 6,9                           | 2,1                               | 85                 |
| Tre-Jy 328+780, oikea reuna        | 5650      | 23,7                           | 0,8                           | 0,5                           | 0,3                               | 25                 |
| Tre-Jy 328+920, oikea reuna        | 5152      | 31,0                           | 3,4                           | 1,5                           | 0,6                               | 36                 |
| Tre-Jy 328+920, raiteen keskilinja | 5737      | 36,0                           | 11,1                          | 4,9                           | 1,6                               | 52                 |

**Hienoaineksista määritetyt lajitteiden <20 µm ja <2 µm osuudet hienoaineksessa (<63 µm) (Sedigraph-analyysi)**  
**(PP = pölkyn pää, RK = raiteen keskilinja)**

| Näyte km<br>(Tre – Jy) | Raekoko (µm) |    | Näyte km   | Raekoko (µm) |    |
|------------------------|--------------|----|------------|--------------|----|
|                        | 20           | 2  |            | 20           | 2  |
| 195+065 PP             | 54           | 11 | 328+120 PP | 50           | 9  |
| 195+065 RK             | 57           | 10 | 328+120 RK | 39           | 5  |
| 195+325 PP             | 64           | 16 | 328+160 PP | 56           | 11 |
| 195+450 PP             | 63           | 13 | 328+180 PP | 41           | 6  |
| 195+760 PP             | 57           | 11 | 328+240 PP | 58           | 11 |
| 195+760 RK             | 59           | 12 | 328+240 RK | 46           | 9  |
| 195+900 PP             | 57           | 11 | 328+270 PP | 57           | 10 |
| 196+170 PP             | 50           | 9  | 329+330 PP | 37           | 6  |
| 196+345 PP             | 58           | 10 | 329+410 PP | 48           | 9  |
| 196+345 RK             | 55           | 10 | 329+410 RK | 56           | 13 |
| 196+520 PP             | 54           | 10 | 329+720 PP | 59           | 14 |
| 196+625 PP             | 64           | 13 | 329+780 PP | 34           | 7  |
| 196+860 PP             | 65           | 13 | 329+920 PP | 44           | 8  |
| 196+860 RK             | 55           | 11 | 329+920 RK | 50           | 8  |

| Näyte km<br>(Ker-Lah) | Raekoko (µm) |    |
|-----------------------|--------------|----|
|                       | 20           | 2  |
| 46+820E PP            | 43           | 11 |
| 46+820P PP            | 52           | 8  |
| 65+300E PP            | 45           | 9  |
| 84+100E PP            | 45           | 9  |

| Näyte (TTY)<br>(KaM 0/31,5mm) | Raekoko (µm) |    |
|-------------------------------|--------------|----|
|                               | 20           | 2  |
| Näyte 3                       | 48           | 10 |



## RATAHALLINTOKESKUKSEN JULKAISUJA A-SARJASSA

- 1/2003 Katsaus Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämistoimintaan
- 2/2003 Instrumentation and Modelling of Railway Culverts
- 3/2003 Rautatieliikenteen onnettomuuksien ja vaaratilanteiden raportoinnin kehittäminen
- 4/2003 Henkilöliikenneasemien esteettömyyskartoituksen tuloksia
- 1/2004 Tavaraliikenteen ratapihavisio ja -strategia 2025
- 2/2004 Rautateiden kaukoliikenteen asemien palvelutaso ja kehittämistarpeet
- 3/2004 Rautatieinfrastruktuurin elinkaarikustannukset
- 4/2004 Murskatun kalliokiviaineksen hienoneminen ja routivuus radan rakennekerroksissa
- 5/2004 Radan kulumisen rajakustannukset vuosina 1997–2002
- 6/2004 Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997–2002
- 7/2004 Ratakapasiteetin jakamisen vaatimukset ja liikenteen suunnittelun tila
- 8/2004 Stabiiliteetiltaan kriittiset ratapenkereet, esitutkimus
- 9/2004 Ratapenkereitten leveys ja luiskakaltevuus, esitutkimus
- 10/2004 Lähtökohtia ratapihojen kapasiteetin mittaamiseen
- 1/2005 Sähköratamaadoitusten perusteet – suojarakenteet, rakennukset ja laiturirakenteet
- 2/2005 Kerava–Lahti-oikoradan ennen-jälkeen vaikutusarviointi, ennen-vaiheen selvitys
- 3/2005 Ratatietojen kuvaaminen – ratatietokanta ja verkkoselostus
- 4/2005 Kaakkois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
- 1/2006 Ratahallintokeskuksen tutkimus- ja kehittämisstrategia
- 2/2006 Rautatie ja sen vaarat osana lasten ympäristöä
- 3/2006 Matkustajainformaatiojärjestelmien arviointi Tampereen, Toijalan ja Hämeenlinnan rautatieasemilla
- 4/2006 Radan välityskyvyn mittaamisen ja tunnuslukujen kehittäminen
- 5/2006 Deformation behaviour of railway embankment materials under repeated loading
- 6/2006 Research and Development Strategy of the Finnish Rail Administration
- 7/2006 Rautatieliikenne 2030 -suunnitelman lähtökohdat ja vaikutustarkastelut
- 8/2006 Vanhojen, paalutettujen ratapenkereiden korjaus
- 9/2006 Ratarakenteissa käytettävien kalliomurskeiden hienoneminen ja routimisherkyys
- 10/2006 Radan stabiiliteetin laskenta, olemassa olevat penkereet  
Kirjallisuustutkimus ja laskennallinen tausta-aineisto
- 11/2006 Rautatieinfrastruktuurin kehitystarpeet suuryksikkökuljetusten yleistyessä
- 12/2006 Pasilan aseman esteettömyyskartoitus ja toimenpideohjelma
- 1/2007 Akselipainon noston tekniset edellytykset ja niiden soveltuminen  
Luumäki–Imatra-rataosuudelle
- 2/2007 Radan kulumisen rajakustannukset 1997–2005
- 3/2007 Marginal Rail Infrastructure Costs in Finland 1997–2005
- 4/2007 Ratarakenteen kuormituksen määrittäminen stabiiliteettitarkasteluihin
- 5/2007 Pohjois-Suomen rataverkon tavaraliikenteen kehittäminen
- 6/2007 Suomen rataverkon tärinäselvitys  
Kirjallisuuskatsaus ja tärinäkohteet vuosina 2000–2006
- 7/2007 Luvattomien radanylitysten välttäminen



**RATAHALLINTOKESKUS  
BANFÖRVALTNINGSCENTRALEN**

Julkaisija:

Ratahallintokeskus

Keskuskatu 8, PL 185, 00101 Helsinki

puh. 020 751 5111, fax 020 751 5100

[www.rhk.fi](http://www.rhk.fi)

ISBN 978-952-445-197-0 (nid.)

ISBN 978-952-445-198-7 (pdf)

ISSN 1455-2604